

วารสาร

ศรีปทุม ปริทัศน์

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN: 2985 - 1734 (Print)

ISSN: 2985 - 1742 (Online)

SRIPATUM REVIEW



**SRIPATUM
REVIEW
OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY**

SRIPATUM
UNIVERSITY

ปีที่ 17 มกราคม - ธันวาคม 2568

Vol.17 January - Decemerr 2025

SPU
SRIPATUM
UNIVERSITY

วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี SRIPATUM REVIEW OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารทางวิชาการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการแก่บุคคลทั่วไป ทั้งแวดวงวิชาการและสังคม ส่งเสริม และกระตุ้นให้เกิดการวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ในสาขาวิชาต่าง ๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยสาขาของบทความที่รับตีพิมพ์ประกอบด้วย (1) General Computer Science (2) General Energy (3) General Engineering (4) Architecture และ (5) General Environmental Science โดยจัดพิมพ์เผยแพร่ปีละ 1 ฉบับ ในเดือนธันวาคมของทุกปี โดยจัดส่งให้ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำนักงานรับรองมาตรฐานและประเมินคุณภาพการศึกษา (องค์การมหาชน) (สมศ.) สำนักงานเลขาธิการสภาการศึกษา (สกศ.) หน่วยงานและสถาบันการศึกษาต่าง ๆ

กองบรรณาธิการวารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีความยินดีรับบทความวิจัย (Research article) บทความทางวิชาการ (Academic article) บทความปริทัศน์ (Review article) และบทความวิจารณ์หนังสือ (Book review) ที่ยังไม่เคยเผยแพร่ในวารสารฉบับอื่นมาก่อน ผู้สนใจสามารถดูรายละเอียดได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/spurst>

กองบรรณาธิการ วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและการประกันคุณภาพการศึกษา มหาวิทยาลัยศรีปทุม

2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ : 0-2579-1111 ต่อ 1331, 1252, 1155

โทรสาร : 0-2579-1111 ต่อ 2187

Email : spujournal@spu.ac.th

- กองบรรณาธิการสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาและตัดสินใจตีพิมพ์บทความในวารสาร
- บทความทุกเรื่องจะได้รับการตรวจสอบทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิ แต่ข้อความและเนื้อหาในบทความที่ตีพิมพ์เป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว มิใช่ความคิดเห็นและความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยศรีปทุม
- การคัดลอกอ้างอิงต้องดำเนินการตามการปฏิบัติในหมู่นักวิชาการโดยทั่วไป และสอดคล้องกับกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

บทบรรณาธิการ

วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารระดับชาติที่ออกปีละ 1 ฉบับ สำหรับฉบับนี้เป็นปีที่ 17 ประจำเดือน มกราคม-ธันวาคม 2568 ซึ่งปัจจุบันอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 โดยวารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เกิดมาจากปณิธานของมหาวิทยาลัยศรีปทุม คือ “ปัญญา เชี่ยวชาญ เปิกบาน คุณธรรม” และปรัชญาที่ว่า “การศึกษาสร้างคน คนสร้างชาติ” โดยมุ่งหวังว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นแหล่งข้อมูลทางการวิจัยและทางวิชาการระดับชาติทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนักศึกษา

สำหรับวารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเล่มนี้ ยังคงเข้มข้นไปด้วยเนื้อหาสาระทางวิชาการ กองบรรณาธิการได้ให้ความสำคัญในการพิจารณาและคัดเลือกบทความที่มีคุณภาพมาลงตีพิมพ์ โดยทุกบทความได้ผ่านการกลั่นกรองจากกองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ตรงสาขาเพื่อตรวจสอบคุณภาพของบทความก่อนลงตีพิมพ์ โดยผู้ประเมินไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ประเมินบทความ (Double-blind peer review) เพื่อให้วารสารฉบับนี้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับระดับชาติและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง สำหรับวารสารฉบับนี้ ประกอบด้วย บทความวิจัยจำนวน 6 เรื่อง เช่น “ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ” “การแบ่งส่วนหัวใจห้องบนซ้ายจากภาพ MRI สามมิติแบบกึ่งมีผู้สอนด้วยเทคนิคฉลากเทียมที่ปรับตามความเชื่อมั่น” “นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด” เป็นต้น

กองบรรณาธิการวารสารศรีปทุมปริทัศน์ มีความมุ่งมั่นที่จะพัฒนาวารสารฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีให้มีคุณภาพสูงขึ้นจนถึงระดับนานาชาติในอนาคต ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกทุกท่านที่กรุณาเป็นผู้ประเมินบทความอย่างมีคุณภาพให้กับทางกองบรรณาธิการ และขอเชิญชวนคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นิสิต และนักศึกษา เสนอบทความเข้ารับการพิจารณาถ้อยแถลงตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่สู่สาธารณะ อันจะนำไปสู่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยท่านสามารถส่งบทความต้นฉบับได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารศรีปทุมปริทัศน์ (ดังรายละเอียดท้ายเล่ม) และหากท่านมีข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะประการใดที่จะนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น กองบรรณาธิการยินดีรับข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะนั้นด้วยความขอบคุณยิ่ง



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนายุทธ์ แสนเงิน)

บรรณาธิการ

- เจ้าของ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนายุทธ์ แสนเงิน

บรรณาธิการผู้พิมพ์ผู้โฆษณา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนายุทธ์ แสนเงิน

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.นवल เหล่าศิริพจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ บุญเสนอ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อัศม์เดช วานิชชินชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ บัณฑิตวัฒนาวงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ จันทน์ เพชรานนท์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ซิษณุ อัมพรายนัน	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เด่นชัย วรเดชจำเริญ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ฝ่ายจัดการและเลขานุการกองบรรณาธิการ

ดร.ศิริพร ทองแก้ว

ฝ่ายประชาสัมพันธ์

นายอภิมุข สดมพฤกษ์

ฝ่ายศิลปกรรมและจัดทำรูปเล่ม

นางฉวีวรรณ สถาป นายสุรัตน์ชัย ชื่นตา

ฝ่ายพิสูจน์อักษร

ว่าที่ร้อยตรี สมเกียรติ แสงอรุณเฉลิมสุข

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 1 ฉบับ ประจำเดือน มกราคม – ธันวาคม

สถานที่จัดพิมพ์

บริษัท สยามสปอร์ต ซินดิเคท จำกัด (มหาชน) โทร. 0 2508 8000

CONTENTS

SRIPATUM REVIEW OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

บทความวิจัย

- 11 ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ : ประยูร ธรรมาธิวัฒน์, ประสงค์ ปราณีตพลกรัง, พายัพ ศิรินาม
- 29 การศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนโครงสร้างอาคารระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กชุบพอร์น : กรณิศศึกษา บ้านดีศรีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน : ภัทร์ แผนสมบุรณ์, ศุภรัชชัย วรรัตน์, สุรศักดิ์ จันฉาย, ประยุทธ์ ฤทธิเดช, ณัฏฐ์ นาคกร
- 46 การแบ่งส่วนหัวใจห้องบนซ้ายจากภาพ MRI สามมิติแบบกึ่งมีผู้สอนด้วยเทคนิคฉลากเทียมที่ปรับตามความเชื่อมั่น : พีรสรณ์ รัตนธำรง, ธนาสัย สุคนธ์พันธุ์
- 62 การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือในการพัฒนาแบบจำลองการประเมิน AUN-QA : วณิดา ปานนพภา, ปราณี มณีรัตน์
- 82 นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด : พรหมพัชร์ บุญรักษา, อนุสรณ์ ผ่องประภา, สมมาตร ทองคำ, มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม, อนุวิทย์ ลิมาวงษ์ปราณี, อนุวัต ลิมาวงษ์ปราณี, อธิระพงษ์ บุญรักษา
- 98 การพยากรณ์ความเร็วลมด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก และปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้: กรณีศึกษา จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย : เกศรา พลไชย, อธิระพงษ์ บุญรักษา, พรหมพัชร์ บุญรักษา

จริยธรรมการตีพิมพ์ผลงานในวารสารศรีปทุมปริทัศน์

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1. บทบาทของบรรณาธิการ (Editor)

1.1 บรรณาธิการมีบทบาทหน้าที่ในการพิจารณาคุณภาพของบทความให้สอดคล้องกับจุดเน้นและขอบเขต (Focus and Scope) ของวารสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นของการลอกเลียนวรรณกรรม (Plagiarism) ก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

1.2 คัดเลือกบทความที่ผ่านการพิจารณาคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และปรับแก้จากผู้เขียนบทความจนครบถ้วนสมบูรณ์ตามผลการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว

1.3 พิจารณาบทความที่จะตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร โดยบทความต้องมีความครบถ้วนตามองค์ประกอบที่ระบุไว้ในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (Author Guidelines) กรณีเป็นบทความวิจัยต้องมีวิธีการวิจัยที่ถูกต้อง มีผลการวิจัยที่ชัดเจน น่าเชื่อถือ มีข้อค้นพบ และข้อเสนอแนะที่สอดคล้องกับวิธีการวิจัยและผลการวิจัย

1.4 ทำความเข้าใจกับผู้เขียนถึงประเด็นที่ไม่ชัดเจนในบทความ เช่น ข้อค้นพบที่ไม่สอดคล้องกับผลการวิจัย ความผิดพลาดของตัวเลข หรือภาพประกอบไม่ชัดเจน และสื่อสารไปยังผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความได้รับทราบ

1.5 ปฏิเสธการรับตีพิมพ์เผยแพร่บทความที่เคยมีการเผยแพร่ไปแล้วก่อนหน้านี้ บทความที่ไม่มีการอ้างอิงแหล่งข้อมูล หรือแหล่งข้อมูลไม่อนุญาตให้นำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ เผยแพร่ซ้ำ หรือมีการละเมิดลิขสิทธิ์ รวมทั้งบทความที่ขาดจริยธรรม ใช้ภาษาที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม แสดงออกถึงความรุนแรง และความไม่เสมอภาค

1.6 ไม่มีส่วนได้ส่วนเสีย ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

1.7 ไม่นำข้อมูลของผู้เขียน และผู้ประเมินบทความไปเผยแพร่ต่อในทางใดทางหนึ่ง

1.8 ไม่นำข้อมูลบางส่วนหรือทั้งหมดในบทความมาไปเป็นส่วนหนึ่งของผลงานตนเอง

2. บทบาทของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewer)

2.1 ทราบถึงกระบวนการคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิตามนโยบายของวารสาร รับทราบนโยบายของวารสาร และกระบวนการพิจารณาบทความของวารสาร ทั้งวิธีการพิจารณา ระยะเวลา การรายงานผลการพิจารณา และการนำส่งผลการพิจารณาเป็นอย่างดี

2.2 รับพิจารณาบทความเฉพาะสาขาที่มีความเชี่ยวชาญ

2.3 พิจารณาบทความโดยไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียนบทความ

2.4 หากพบว่าบทความที่กำลังพิจารณาอยู่เป็นบทความที่มีการลอกเลียนวรรณกรรมหรือละเมิดลิขสิทธิ์ ต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที

2.5 ให้ความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เพื่อช่วยเหลือผู้เขียนบทความ ให้สามารถเขียนบทความได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยปราศจากอคติทางด้านเชื้อชาติ ศาสนา เพศ และความเชื่อทางส่วนบุคคล

2.6 ประสานงานกับบรรณาธิการเพื่อขอข้อมูลเพิ่มเติม เมื่อพบปัญหาในระหว่างการพิจารณาคุณภาพบทความ โดยไม่สืบทอดช่องทางการติดต่อกับผู้เขียนด้วยตนเอง

2.7 ไม่ปรับแก้บทความตามแนวทางการเขียนของตนเองหากบทความนั้นมีการใช้ภาษาที่เหมาะสมและชัดเจนอยู่แล้ว อาจดำเนินการเพียงให้ความคิดเห็นเท่าที่สำคัญและจำเป็นเพื่อให้ผู้เขียนบทความปรับแก้บทความให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

2.8 ไม่นำข้อมูลบางส่วนหรือทั้งหมดในบทความไปเป็นส่วนหนึ่งของผลงานตนเอง

3. บทบาทของผู้เขียน (Author)

3.1 ผู้เขียนได้รับทราบนโยบายและข้อกำหนดของวารสารเป็นอย่างดี รวมทั้งศึกษารายละเอียดคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (Author Guidelines) อย่างดีแล้ว

3.2 ทำหน้าที่เป็นผู้เขียนบทความ หรือผู้เขียนร่วมอย่างแท้จริง

3.3 ทราบถึงการไม่ละเมิดทรัพย์สินทางปัญญา การลอกเลียนวรรณกรรม และผลประโยชน์ทับซ้อน และปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด

3.4 บทความที่ผู้เขียนส่งมายังวารสาร ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ หรือเป็นส่วนหนึ่งของบทความที่เคยตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อนหน้าแล้ว

3.5 ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการอ้างอิงเอกสารตามที่วารสารกำหนด

3.6 ผู้เขียนต้องดำเนินการปรับปรุงแก้ไขบทความตามความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด

3.7 ผู้เขียนต้องมีความซื่อสัตย์ในการรายงานผลการวิจัย โดยไม่สรุปและอภิปรายผลการวิจัยตามความคิดเห็นและความรู้สึกของตนเอง

4. จริยธรรมการวิจัยในคนหรือสัตว์ (ถ้ามี)

หากผลงานมีการใช้ข้อมูลจากการทำวิจัยในคนหรือสัตว์ ผู้เขียนต้องแสดงให้เห็นถึงการได้รับการรับรองจริยธรรมการวิจัยในคนและสัตว์ในบทความให้ชัดเจน

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความ

Reviewers

ศาสตราจารย์ ดร.โกสุ่ม จันทร์ศิริ
ศาสตราจารย์ ดร.จงจิตร หิรัญลาภ
ศาสตราจารย์ ดร.ชิดชนก เหลือสินทรัพย์
ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยุพาพิน

ศาสตราจารย์ ดร.ไพบูลย์ ปัญญาคะโป
ศาสตราจารย์ ดร.สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์
ศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ยกส้าน
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน
รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาคะโป
รองศาสตราจารย์ ดร.กมล บุชบา
รองศาสตราจารย์ ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติชัย ธนทรัพย์สิน
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข

รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพัตรภรณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชิต เหล่าวัฒนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน
รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติวดี ชัยวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ บัณฑิตวัฒนาวงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช
รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา วสุศรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ รุจิระยรรยง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดาเดียว มยุรีสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.นวลวรรณ สุนทรภักซ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา ชัยบุตร
รองศาสตราจารย์ ดร.นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เจริญกิจการ
รองศาสตราจารย์ ดร.บดินทร์ รัชมีเทศ
รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินทวีวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โชติโกไร
รองศาสตราจารย์ ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล

รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษพงษ์ศธร
รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช ภูมิพลกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.พิรุทธิ์ ชาญเศรษฐกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.พูลพงศ์ สุขสว่าง
รองศาสตราจารย์ ดร.ภักพงศ์ พจนารถ
รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล กงศ์หิรัญ
รองศาสตราจารย์ ดร.มณิศรา พิริยวิรุฒม์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร

รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวณู กุลาคี

รองศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล อันแผ้ว

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งรศมี บุญดาว

รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองรอง สุธิธีระ

รองศาสตราจารย์ ดร.วรา วราวิทย์

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช

รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมานนท์

รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ชูติมาสกุล

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระ บุญจริง

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิวาพร ลงยันต์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี

รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต

รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิพัร โอมมณี

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สมโพธิ วิวิธเกยุรวงศ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์

รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธาริน สถาปัตตานนท์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ นิวิศพงษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจวาณิชย์

รองศาสตราจารย์ ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร

รองศาสตราจารย์ ดร.อนงค์นาฏ ศรีวิหค

รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม

รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อมร พิมาณมาศ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร เก่งพล

รองศาสตราจารย์ ดร.อลิสา ทรงศรีวิทยา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาริต ธรรมโน

รองศาสตราจารย์ ดร.อัศม์เดช วานิชชินชัย

รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ

รองศาสตราจารย์ เรือเอก ดร.สราวุธ ลักษณะโต

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์

รองศาสตราจารย์ ชาลี ตระกูลการ

รองศาสตราจารย์ ยืน ภู่วรรณ

รองศาสตราจารย์ ศิริชัย พงษ์วิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยนครพนม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยสยาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยมหิดล

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ สถาพร ชาดาคม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญลิน จิรัฐชยุต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันยารัตน์ ศรีวิสุทธิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมยุทธ ไชยวงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณศ พันธ์สวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.งามนิจ ชื่นบุญงาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกฤรัตน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศ เอี่ยมวรภูมิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร ยวงเงิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เด่นชัย วรเดชจำเริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา สุขวารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงลักษณ์ บุญรัตน์กิจ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวรรณ อำเอี่ยม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพล มหายศนันท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพัทธ์ จงสวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญอ้อม โฉมทิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรธรรม เกษราพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ หาญพัฒนากิจ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ กิตติวินทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพจิตร ผาวัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูกิจ พานิชกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ วงศ์โดยหวัง ศิริเจริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรพล สุโหตุ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตถากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพร อุษณวสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐชัย ชัยสนิทด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ กรวยสวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรค์ศิริ ธนชุดิวัต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตต์ ครุจิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัทธรา สุทธสุภา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภชัย วงศ์บุญยัยง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาสพงษ์ ฐิ์ทำนอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยบูรพา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยพะเยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยนเรศวร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรกิจ ท้วมเพิ่มทรัพย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ มั่งสิงห์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศิษฐ์ ไรจนันต์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนรรฆ ชันธะขนะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุนิติ พิณโสภณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาริก สุรินตะ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ กลั่นเงิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชียง เกาซิด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฐมพงษ์ ชนะนิล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพชร นันทวิวัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรระ เครือรัฐดีกาล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย บุญวาต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ อริยชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนาจ วังจัน
พันเอก ดร.พิศุทธิ์ ดารารัตน์
พันโท ดร.ต้องการ แก้วเฉลิมทอง
ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์
ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล
ดร.ชาลี วรกุลพิพัฒน์

ดร.ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์
ดร.ธัญภัสสร ทองเย็น
ดร.ประกอบ ขาดิฎกต์
ดร.ประภาพร รัตนธารง
ดร.พระพิพัฒน์ ภาสบุตร
ดร.พีรเดช ณ น่าน
ดร.ราชศักดิ์ สมยานนทนากุล
ดร.มงคล อัสวดีลภฤทธิ์
ดร.วรพงษ์ ลีวัฒนกิจ
ดร.สมรภัช เพชรราตรี
ดร.สิรินธร ลิมปนาท
ดร.สุคนทิพย์ สุภาจันทร์
ดร.อภิบาล พุกขานูบาล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
กรมวิทยาศาสตร์ทหารบก
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์
แห่งชาติ สวทช.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
กสท.โทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กสท.โทรคมนาคม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อม ในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ

ประยูร ธรรมาธิวัฒน์^{1,*}, ประสงค์ ปราณีตพลกรัง², พายัพ ศิรินาม³

^{1,2,3}หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Received: 19 November 2024

Revised: 14 February 2025

Accepted: 14 February 2025

บทคัดย่อ

กองทัพอากาศมีภารกิจในการเตรียมกำลังและใช้กำลังทางอากาศเพื่อรักษาไว้ซึ่งความมั่นคงของประเทศ อย่างไรก็ตาม การรักษาความมั่นคงจะต้องดำเนินการทั้งทางกายภาพและดิจิทัล โดยเฉพาะทางดิจิทัลนั้นจะเน้นในโครงสร้างพื้นฐานทางดิจิทัลที่สำคัญยิ่งยวด ในขณะเดียวกันยังต้องคำนึงถึงความเสี่ยงและภัยคุกคามทางไซเบอร์อีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ ทั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์สมการเชิงโครงสร้าง จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 810 คน ที่เป็นบุคลากรที่ปฏิบัติงานด้านเทคโนโลยีดิจิทัลและความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ผลการวิจัย พบว่า กองทัพอากาศมีความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์อยู่ในระดับมากที่สุด และปัจจัยขีดความสามารถความพร้อมด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยีมีอิทธิพลเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ดังนั้น การพัฒนาขีดความสามารถด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศจึงควรพัฒนาในด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยี ไปพร้อม ๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านบุคลากรและกระบวนการนั้นสำคัญมาก ที่จะช่วยเสริมสร้างความแข็งแกร่งในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศได้อย่างยั่งยืน นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอกรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์เพื่อเสริมสร้างความพร้อมและเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์ของกองทัพอากาศ

คำสำคัญ: ความพร้อมทางไซเบอร์ ภัยคุกคามทางไซเบอร์ ขีดความสามารถทางไซเบอร์

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: pmgoth@gmail.com

Causal Factors Influence the Cybersecurity Readiness Capability in the Royal Thai Air Force

Prayoon Thammathiwat^{1,*}, Prasong Praneetpolgrang², Payap Sirinam³

^{1,2,3}Master of Engineering Program in Defense Technology, Office of Graduate Studies,
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy, Saraburi, Thailand

Received: 19 November 2024

Revised: 14 February 2025

Accepted: 14 February 2025

Abstract

Royal Thai Air Force's mission is to prepare and deploy air power to maintain national security. However, maintaining security must be conducted both physically and digitally. In particular, the digital aspect focuses on critical digital infrastructure. At the same time, cyber risks and threats must also be taken into consideration. This research aims to study and analyze the causal factors that influence the cybersecurity readiness capability in the Royal Thai Air Force. The researchers employ structural equation modeling, using a sample of 810 personnel working in digital technology and cybersecurity for the Royal Thai Air Force. The research findings indicate that the Royal Thai Air Force has the highest level of readiness for cybersecurity. Additionally, the factors of personnel, processes, and technology readiness capability positively influence the cybersecurity readiness capability in the Royal Thai Air Force. Therefore, developing cybersecurity capabilities for the Royal Thai Air Force should focus on personnel, processes, and technology simultaneously. Particularly, the aspects of personnel and processes are of great importance, as it will significantly enhance the sustainable strength of the Royal Thai Air Force's cybersecurity. Additionally, we have proposed a cybersecurity framework aimed at enhancing the readiness and strengthening the effectiveness of the Royal Thai Air Force in preventing cyber threats.

Keywords: Cyber Readiness, Cyber Threats, Cyber Capabilities

*Corresponding Author; E-mail: pmgoth@gmail.com

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กองทัพอากาศมีภารกิจสำคัญในการรักษาความมั่นคงและเตรียมความพร้อมในการปกป้องราชอาณาจักร รวมถึงการพัฒนาประเทศและแก้ปัญหาความขัดแย้งต่าง ๆ ซึ่งภารกิจดังกล่าวเป็นไปได้ทั้งแบบการรบและไม่ใช้การรบ รวมถึงการช่วยเหลือด้านมนุษยธรรมและบรรเทาภัยพิบัติต่าง ๆ โดยยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2563) (Royal Thai Air Force, 2020) ให้ความสำคัญในการกำหนดยุทธศาสตร์เพื่อเสริมสร้างสมรรถนะและความพร้อมในการป้องกันประเทศและรักษาผลประโยชน์แห่งชาติ ซึ่งกองทัพอากาศจำเป็นต้องเตรียมกองกำลังให้มีความพร้อมสำหรับการปฏิบัติจริงมากที่สุด โดยหนึ่งในกลยุทธ์ที่กองทัพอากาศมุ่งเน้นคือการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในการเสริมสร้างขีดความสามารถด้านการปฏิบัติการที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ซึ่งกองทัพอากาศจำเป็นต้องพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ากับระบบสารสนเทศของกองทัพ และพัฒนาระบบสารสนเทศและระบบฐานข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ

การพัฒนาด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารของกองทัพอากาศมีความเสี่ยงจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเชื่อมโยงเครือข่ายข้อมูลที่สำคัญและการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการปฏิบัติการต่าง ๆ รวมถึงการพัฒนาของภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีการโจมตีที่ซับซ้อนและที่รุนแรงมากขึ้น ทำให้ระบบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์แบบดั้งเดิมไม่เพียงพอต่อการจัดการกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ทันสมัย ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อรับมือภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ซับซ้อนได้จึงเป็นแนวทางในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่กองทัพอากาศจำเป็นต้องดำเนินการ (Laohhapaibon and Kongwut, 2024) กอปรกับ การใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยมีความท้าทายในด้านต่าง ๆ เช่น ความพร้อมด้านบุคลากรที่มีความรู้และทักษะในการใช้เทคโนโลยี ความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานและกระบวนการดำเนินงานที่สอดคล้องกัน และความพร้อมด้านเทคโนโลยีที่มีความเข้ากันได้เพื่อให้การปฏิบัติงานสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น เป็นต้น

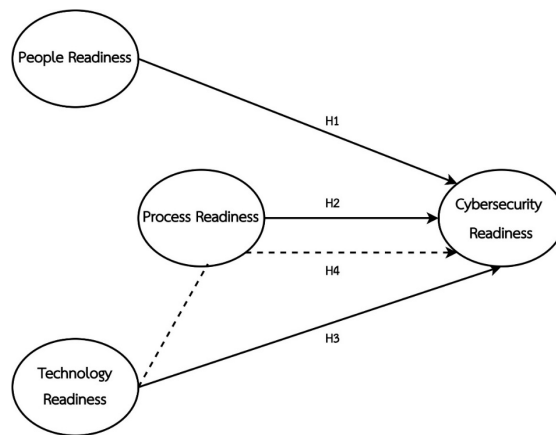
การวิจัยครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ ทั้งนี้ เพื่อพัฒนาแนวทางในการส่งเสริมและพัฒนาขีดความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ในประเด็นด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยี นอกจากนี้ ผู้วิจัยพัฒนารอบการรักษความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ เพื่อเสริมสร้างความพร้อมและเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์ ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะช่วยให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญและช่องโหว่ของการพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมดังกล่าวให้กองทัพอากาศสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายและกลยุทธ์เพื่อพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ
2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ
3. เพื่อนำเสนอกรอบการรักษความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ผู้วิจัยพัฒนารอบแนวคิดการวิจัยของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ (RTAF Cybersecurity Readiness) ประกอบด้วยความพร้อมด้านบุคลากร (People Readiness) ความพร้อมด้านกระบวนการ (Process Readiness) และความพร้อมด้านเทคโนโลยี (Technology Readiness) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

สมมุติฐานการวิจัย

H1: ความพร้อมด้านบุคลากรมีอิทธิพลเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ

H2: ความพร้อมด้านกระบวนการมีอิทธิพลเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ

H3: ความพร้อมด้านเทคโนโลยีมีอิทธิพลเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ

H4: ความพร้อมด้านเทคโนโลยีมีอิทธิพลทางอ้อมต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศผ่านความพร้อมด้านกระบวนการ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คน กระบวนการ และเทคโนโลยี

การพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศจำเป็นต้องพึ่งพาปัจจัยภายในองค์กรเพื่อพัฒนาขีดความสามารถดังกล่าว ผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรมบนพื้นฐานของ Leavitt's Diamond Framework (Leavitt, 1965) ที่กล่าวถึง 4 องค์ประกอบหลักขององค์กร ได้แก่ 1) บุคลากร (People) มุ่งเน้นที่ความรู้ ความสามารถและพฤติกรรมต่าง ๆ ของบุคลากรในองค์กร 2) งาน (Tasks) กระบวนการ และกิจกรรมที่ดำเนินการเพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการทำงาน 3) โครงสร้าง (Structure) การจัดองค์กรเพื่อแบ่งฝ่ายงาน

ความสัมพันธ์ และลำดับชั้นการบริหาร และ 4) เทคโนโลยี (Technology) เครื่องมือหรือเทคนิคที่ใช้เพื่อสนับสนุนการทำงาน ซึ่งความเปลี่ยนแปลงในแต่ละองค์ประกอบจะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่น ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในองค์กรด้วย

Berlilana et al. (2021) ชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเพียงพอ การพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้และทักษะ และการสร้างสภาพแวดล้อมให้อยู่ในบรรยากาศของการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์จะส่งผลต่อการพัฒนาความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ขององค์กร ในขณะที่ Eilts (2020) พบว่า การให้ความสำคัญจากผู้บริหาร การปรับกิจกรรมการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ให้สอดคล้องกับเป้าหมายขององค์กรและการปฏิบัติงาน และการใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป ส่งผลที่ดีต่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ นอกจากนี้ Borgman, Mubarak, and Choo (2015) ศึกษาความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัย ไซเบอร์ของหน่วยงานรัฐบาลในประเทศออสเตรเลีย ได้กล่าวถึงความสำคัญของการสนับสนุนจากผู้บริหารและการสร้างความตระหนักรู้ให้แก่บุคลากร การใช้กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์และกลไกการกำกับดูแล รวมถึงการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานทางเทคโนโลยีและการควบคุมการเข้าถึงข้อมูลและระบบสำคัญขององค์กร โดยบ่งชี้ว่าการดำเนินงานต่าง ๆ อาจต้องเผชิญความท้าทายจากการขาดความพร้อมขององค์กรในด้านความรู้และทักษะของบุคลากร การดำเนินงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ และการขาดแคลนงบประมาณ

การพัฒนากรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ

NIST Cybersecurity Framework version 1.1 คือ กรอบการทำงานที่พัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) เพื่อช่วยองค์กรจัดการและลดความเสี่ยงทางไซเบอร์อย่างมีประสิทธิภาพ (NIST, 2018) โดยกรอบมุ่งเน้นไปที่การดำเนินการที่สามารถปรับใช้ได้ไม่ว่าในวงกว้างเพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับข้อมูลและโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ ประกอบด้วยห้าฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การระบุ (Identify) การป้องกัน (Protect) การตรวจหา (Detect) การรับมือ (Respond) และการกู้คืน (Recover) ซึ่งครอบคลุมกระบวนการจัดการความปลอดภัยไซเบอร์ในทุกมิติ ทั้งยังเชื่อมโยงกับมาตรฐานสากล เช่น ISO/IEC 27001 เพื่อให้เหมาะสมกับองค์กรที่มีข้อจำกัดและความต้องการที่หลากหลาย การใช้งานกรอบนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับมือภัยคุกคาม และส่งเสริมความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่มีประสิทธิภาพได้ในระยะยาว

ISO/IEC 27001:2022 เป็นมาตรฐานสากลสำหรับการจัดการความมั่นคงปลอดภัยของสารสนเทศในองค์กร (International Organization for Standardization, 2022) โดยปรับปรุงจากเวอร์ชันก่อนหน้าเพื่อตอบสนองภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มาตรฐานนี้มุ่งเน้นการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) และการกำหนดมาตรการควบคุม (Controls) เพื่อป้องกันและลดผลกระทบจากภัยคุกคามภายในและภายนอกองค์กร ผ่านระบบการจัดการความมั่นคงปลอดภัยของสารสนเทศที่ครอบคลุมทั้งด้านเทคนิค การบริหาร และกระบวนการดำเนินงาน นอกจากนี้ ยังเน้นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ระบบตอบสนองต่อความเสี่ยงที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

Enterprise Security Architecture (ESA) คือกรอบการทำงานเชิงกลยุทธ์ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยองค์กรป้องกันและจัดการความเสี่ยงทางไซเบอร์อย่างเป็นระบบ (Sherwood, Clark, and Lynas, 2005) โดย ESA เป็นส่วนหนึ่งของ Enterprise Architecture (EA) ที่เน้นการผสานเป้าหมายทางธุรกิจเข้ากับมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัย ซึ่ง ESA ช่วยองค์กรระบุ วิเคราะห์ และตอบสนองต่อภัยคุกคามและช่องโหว่ในโครงสร้างของระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ

อย่างมีประสิทธิภาพได้จากการกำหนดนโยบาย มาตรฐาน และแนวปฏิบัติที่ครอบคลุมทุกระดับ ตั้งแต่ระดับกลยุทธ์ถึงปฏิบัติการ นอกจากนี้ ESA ยังเน้นการบูรณาการมาตรการด้านความปลอดภัยเข้ากับกระบวนการทำงาน เพื่อป้องกันและลดผลกระทบจากภัยคุกคามทั้งในระยะสั้นและระยะยาว พร้อมช่วยให้องค์กรพัฒนาระบบที่ยืดหยุ่นและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนและเสี่ยงภัยเพิ่มขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

แบบแผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปร และวิธีการทางสถิติในการช่วยวิเคราะห์ผล

ประชากรและตัวอย่าง

ประชากรที่ศึกษาในการวิจัย ได้แก่ บุคลากรที่ปฏิบัติหน้าที่ในหน่วยงานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีดิจิทัล และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ โดยข้อมูล ณ พ.ศ. 2567 มีจำนวนทั้งสิ้น 1,844 คน ผู้วิจัยได้กำหนดตัวอย่าง โดยใช้เกณฑ์สำหรับการเลือกตัวอย่างในการวิเคราะห์โมเดลสมการเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) เท่ากับ 20 เท่า ของจำนวนพารามิเตอร์ (Hair, 2014) โดยจำนวนพารามิเตอร์ในโมเดลมี 18 พารามิเตอร์ ทำให้ได้ขนาดของประชากรกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 360 คน และเพื่อป้องกันแบบสอบถามที่ไม่สมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงได้แจกแบบสอบถามรวมทั้งสิ้น 1,844 ฉบับ และได้รับผลการตอบแบบสอบถาม 810 ฉบับ

เครื่องมือวิจัย

ผู้วิจัยใช้แบบสอบถาม เรื่อง ความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ โดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคลหรือหน่วยงานของผู้ตอบแบบสอบถาม ส่วนที่ 2 ข้อคำถามเกี่ยวกับความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ โดยใช้มาตรวัดของลิเคิร์ต 5 ระดับ (Five-point Likert Scale) และส่วนที่ 3 ความคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในประเด็นด้านความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์

การศึกษานี้ตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามด้วยการหาค่าความเที่ยงตรง (Validity) โดยส่งแบบสอบถามให้ผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ความเข้าใจเฉพาะด้านจำนวน 5 ท่าน ตามเทคนิค Item Objective Congruence (IOC) โดยข้อคำถามมีค่า IOC มากกว่า 0.6 ทุกข้อ จากนั้นนำแบบสอบถามมาทดสอบความเชื่อมั่น (Reliability) โดยทดลองใช้ (Try Out) กับกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน เพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha Coefficient) ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค อยู่ระหว่าง .831 - .933 จึงแสดงได้ว่าเครื่องมือแบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือ (Nunnally, 1978)

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และการวิเคราะห์โมเดลสมการเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM)

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ สามารถสรุปได้ว่ากองทัพอากาศมีความพร้อมด้านบุคลากร ($\bar{X} = 4.33$, S.D. = 0.72) ความพร้อมด้านกระบวนการ ($\bar{X} = 4.40$, S.D. = 0.66) ความพร้อมด้านเทคโนโลยี ($\bar{X} = 4.23$, S.D. = 0.77) และความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ($\bar{X} = 4.27$, S.D. = 0.75) อยู่ในระดับมากที่สุด ดังแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ

ปัจจัย	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. ความพร้อมด้านบุคลากร	4.33	.643	มากที่สุด
2. ความพร้อมด้านกระบวนการ	4.41	.579	มากที่สุด
3. ความพร้อมด้านเทคโนโลยี	4.22	.682	มากที่สุด
4. ความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์	4.27	.654	มากที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแปร เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรก่อนนำไปวิเคราะห์สมการเชิงโครงสร้าง พบว่า ตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปรมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร จำนวน 6 คู่ มีค่าอยู่ระหว่าง .690 – 0.795 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในระดับไม่สูงเกินไป จึงไม่มีปัญหาสหสัมพันธ์ร่วมเชิงพหุ (Multicollinearity) และตัวแปรทั้งหมดอยู่ในองค์ประกอบร่วมกัน เมื่อพิจารณาค่าสถิติ Barlett's Test of Sphericity มีค่าเท่ากับ 2560, $df = 6$, $p < .001$ และเมทริกซ์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไม่เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.001 ดังนั้น ตัวแปรจึงมีความสัมพันธ์กันอย่างเพียงพอที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) เท่ากับ 0.851 จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรมีความเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์สมการเชิงโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปร (Construct Validity) ประกอบด้วยการวัดความตรงเชิงสอดคล้อง (Convergent Validity) และความตรงเชิงจำแนก (Discriminant validity) ดังนี้

การวัดความตรงเชิงสอดคล้อง (Convergent Validity) เพื่อวัดว่าตัวแปรสังเกตได้สามารถเป็นตัวชี้วัดของตัวแปรแฝงได้หรือไม่ โดยพิจารณาจากค่าความเชื่อมั่นรวมของตัวแปรแฝง (Composite Reliability: CR) ที่แสดงถึงระดับที่ตัวแปรสังเกตได้ร่วมกันอธิบายตัวแปรแฝง ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่สกัดได้ (Average Variance Extract: AVE) ที่แสดงถึงความแปรปรวนของตัวแปรแฝงที่ถูกอธิบายได้จากตัวแปรสังเกตได้ และความเชื่อมั่น (Cronbach's Alpha) ที่แสดงถึงค่าความเที่ยงหรือความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรแฝงทุกตัวแปรมีค่า CR มากกว่า 0.7 ตัวแปรแฝงทุกตัวแปรมีค่า AVE มากกว่า 0.5 แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ร่วมกันอธิบายตัวแปรแฝงได้ในระดับที่ยอมรับได้ (Fornell and Larcker, 1981) และตัวแปรแฝงทุกตัวแปรมีความเชื่อมั่นมากกว่า 0.7 (Nunnally, 1978) ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าทุกตัวแปรมีความตรงเชิงสอดคล้อง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวัดความตรงเชิงสอดคล้อง

ตัวแปร	Factor Loading	CR	AVE	Cronbach
People Readiness		0.867	0.685	0.866
Awareness	.77			
Training and Learning	.85			
Research and Development	.86			
Process Readiness		0.920	0.697	0.925
Strategy and Plan	.86			
Cybersecurity Evaluation	.86			
Cybersecurity Framework	.85			
Cybersecurity Coordination	.77			
Cybersecurity Improvement	.83			
Technology Readiness		0.934	0.740	0.936
Quality and Quantity	.85			
Modern and Efficient	.84			
Protecting Devices	.87			
Detect and Response	.89			
Access and Control	.85			
Cybersecurity Readiness		0.846	0.648	0.843
Cybersecurity Awareness	.76			
Policy	.87			
Cybersecurity Infrastructure	.78			

ผลการความตรงเชิงจำแนก (Discriminant Validity) ซึ่งเป็นการวัดว่าตัวแปรแฝงแต่ละตัวแปรมีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของ AVE ที่ควรมีมากกว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Hair, 2014; Fornell and Larcker, 1981) พบว่า ตัวแปรแฝงทั้ง 4 ตัวแปร มีค่ารากที่สองของ AVE มากกว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร แสดงว่าโมเดลมีการจำแนกตัวแปรได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3

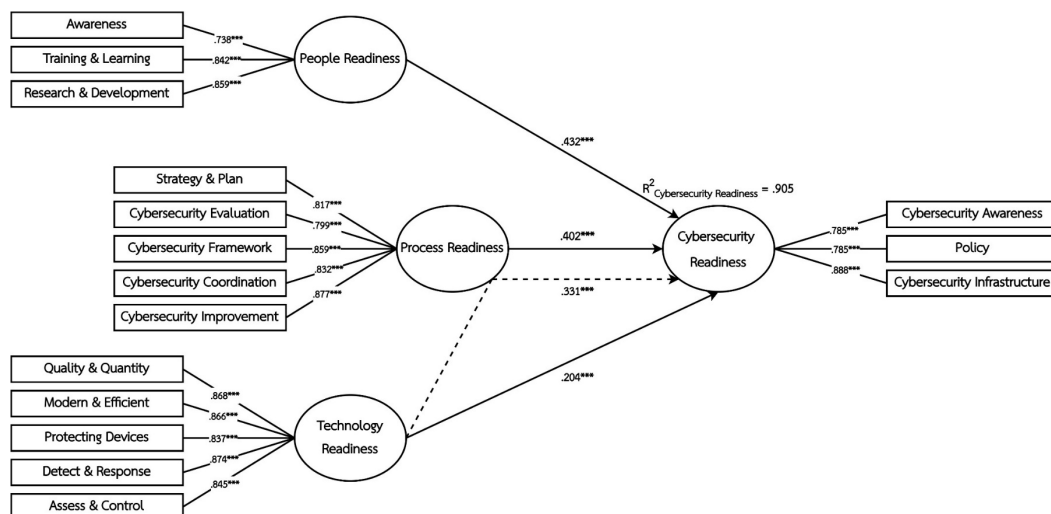
ตารางที่ 3 การวัดความตรงเชิงจำแนก

	People	Process	Technology	CS Readiness
People	0.828			
Process	.772	0.835		
Technology	.690	.745	0.860	
CS Readiness	.764	.795	.793	0.805

หมายเหตุ: ตัวเอียงในเส้นทแยงมุม คือ ค่ารากที่สองของ AVE

ผลการวิเคราะห์โมเดลการวัด (Measurement Model) เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้และตัวแปรแฝง โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) พบว่าในการวิเคราะห์ตัวแปรสังเกตได้ทั้งหมดมีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 0.76 – 0.89 ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.7 (Hair, 2014) แสดงว่า ตัวแปรสังเกตได้สามารถอธิบายตัวแปรแฝงได้เป็นอย่างดีเหมาะสม

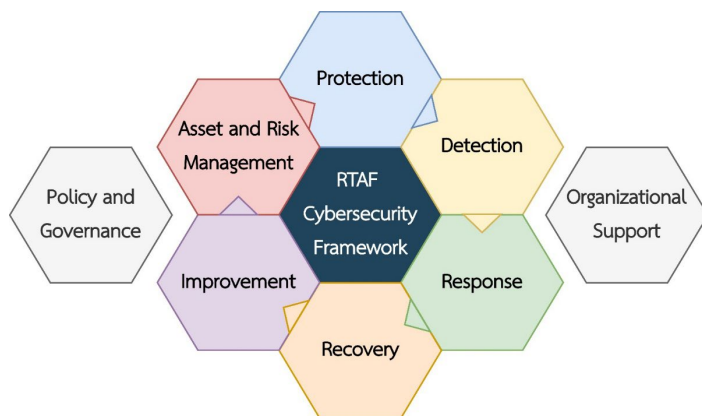
ผลการวิเคราะห์โมเดลเชิงโครงสร้าง ผลการทดสอบความสอดคล้องของโมเดลเชิงโครงสร้างของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ ตามสมมติฐานกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ซึ่งจากการพิจารณาค่าดัชนีความสอดคล้องในครั้งแรกพบว่า โมเดลตามสมมติฐานยังไม่สอดคล้องข้อมูลเชิงประจักษ์ จึงทำการปรับโมเดลโดยพิจารณาจากค่าดัชนีในการปรับ (Modification Indices) จนกระทั่งดัชนีความสอดคล้องผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้ $\chi^2/df = 3.967$, $p\text{-value} = .000$, $GFI = .952$, $NFI = .972$, $TLI = .969$, $CFI = .979$, $RMSEA = .061$, และ $RMR = .021$ แสดงให้เห็นว่า โมเดลที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ดังแสดงในภาพที่ 2 ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์พบว่า 1) ความพร้อมด้านบุคลากร มีอิทธิพลทางตรงเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ โดยมีขนาดอิทธิพลเท่ากับ .432 ที่ระดับนัยสำคัญ .001 2) ความพร้อมด้านกระบวนการ มีอิทธิพลทางตรงเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ โดยมีขนาดอิทธิพลเท่ากับ .402 ที่ระดับนัยสำคัญ .001 3) ความพร้อมด้านเทคโนโลยี มีอิทธิพลทางตรงเชิงบวกต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ โดยมีขนาดอิทธิพลเท่ากับ .204 ที่ระดับนัยสำคัญ .001 4) ความพร้อมด้านเทคโนโลยีมีอิทธิพลทางอ้อมต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศผ่านความพร้อมด้านกระบวนการ โดยมีขนาดอิทธิพลเท่ากับ .331 ที่ระดับนัยสำคัญ .001 และ 5) ความพร้อมด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยี สามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ ได้ร้อยละ 90.5



หมายเหตุ : *** = $p < .001$

ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์โมเดลเชิงโครงสร้าง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนากรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ บนพื้นฐานของการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ ประกอบกับ การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง อาทิ NIST Cybersecurity Framework version 1.1, ISO/IEC 27001:2022 และ Enterprise Security Architecture (ESA) ในที่สุดจะได้กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ

กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศดังนำเสนอในภาพที่ 3 นั้นจะประกอบด้วย 8 องค์ประกอบหลักที่ครอบคลุมตั้งแต่การบริหารองค์กร การดำเนินงาน และการให้ความสนับสนุนการดำเนินงานจากองค์กร โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. นโยบายและการกำกับดูแล (Policy and Governance) เป็นส่วนสำคัญที่กองทัพอากาศต้องให้ความสำคัญในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เพื่อส่งเสริมกระบวนการดำเนินงานและลดความเสี่ยงจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ โดยมีองค์ประกอบดังนี้

1.1 นโยบาย (Policy) การกำหนดนโยบายที่ชัดเจน เพื่อให้ทุกหน่วยงานได้เห็นถึงหลักการและทิศทางในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ซึ่งครอบคลุมถึงการจัดการความเสี่ยงทางไซเบอร์ ขั้นตอนการดำเนินการ การให้สิทธิบุคลากร การพัฒนาของบุคลากร และการสร้างวัฒนธรรมที่ดีทางไซเบอร์

1.2 การกำกับดูแล (Governance) การสร้างโครงสร้างองค์กรที่ส่งเสริมมาตรการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ครอบคลุมถึงการกำหนดบทบาทและความรับผิดชอบของผู้บริหารและบุคลากร การจัดตั้งคณะกรรมการและคณะทำงาน และการประเมินผลเพื่อปรับปรุงนโยบายและกระบวนการทำงานอย่างต่อเนื่อง

1.3 ข้อกำหนด (Regulation) การดำเนินการตามข้อกำหนดด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์อย่างเคร่งครัด ทั้งในระดับองค์กร ประเทศ และนานาชาติ เพื่อให้สามารถภารกิจและกิจกรรมได้อย่างต่อเนื่อง และลดความเสี่ยงจากการถูกกีดกันหรือลงโทษ

2. การสนับสนุนจากองค์กร (Organizational Support) เป็นรากฐานสำคัญที่ช่วยให้การดำเนินงานด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศประสบความสำเร็จ โดยกองทัพอากาศต้องให้ความสนับสนุนใน 3 ด้าน ได้แก่ เงินทุน ทรัพยากร และบุคลากร

2.1 การสนับสนุนด้านเงินทุน (Financial Support) ต้องเพียงพอต่อการพัฒนาระบบด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์อย่างยั่งยืน โดยลงทุนในเทคโนโลยีและเครื่องมือที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ การฝึกอบรมบุคลากร และเงินทุนสำหรับการตอบสนองและฟื้นฟูหลังเกิดเหตุการณ์โจมตีทางไซเบอร์

2.2 ทรัพยากร (Resource) ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัล เทคโนโลยีและเครื่องมือที่เพียงพอทันสมัยและมีประสิทธิภาพ การจัดหาอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การใช้ศูนย์ข้อมูล ข้าราชการกักกันทางไซเบอร์ และการพัฒนาระบบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ รวมถึงการใช้ระบบสำรองข้อมูล

2.3 บุคลากร (Human Resource) โดยการส่งเสริมให้บุคลากรมีความเชี่ยวชาญหรือมีความรู้พื้นฐานด้วยการฝึกอบรมด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ให้แก่บุคลากรทุกระดับ การแต่งตั้งทีมผู้เชี่ยวชาญหรือจ้างผู้เชี่ยวชาญจากภายนอกเพื่อรับมือกับเหตุการณ์โจมตีทางไซเบอร์

3. การระบุทรัพย์สินและความเสี่ยง (Asset and Risk Management) เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้องค์กรสามารถปกป้องทรัพยากรที่สำคัญและลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การจัดการในส่วนนี้ประกอบด้วย การจัดทำรายการทรัพย์สิน การประเมินความเสี่ยง และการจัดลำดับความสำคัญ

3.1 การจัดทำรายการทรัพย์สิน (Asset Inventory) เพื่อการระบุทรัพย์สินที่องค์กรครอบครองเป็นขั้นตอนแรกๆ ที่ช่วยให้เข้าใจว่าอะไรคือสิ่งที่ต้องปกป้อง รวมถึงฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ ข้อมูล และระบบเครือข่าย โดยการจัดทำบัญชีทรัพย์สินและอัปเดตอย่างสม่ำเสมอ

3.2 การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) เพื่อระบุความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับทรัพย์สินที่สำคัญ และประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น โดยการวิเคราะห์ว่าอะไรคือภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้น เช่น การโจมตีทางไซเบอร์ มัลแวร์ หรือการสูญเสียข้อมูล การประเมินผลกระทบถึงความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นหากทรัพย์สินถูกโจมตีหรือสูญเสีย และการคำนวณความเสี่ยง

3.3 การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) เพื่อให้องค์กรสามารถจัดสรรทรัพยากรและความพยายามไปที่การปกป้องทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูงและความสำคัญต่อภารกิจมากที่สุด ซึ่งอาจจัดลำดับความสำคัญของทรัพย์สินตามมูลค่าทางธุรกิจ ความสำคัญต่อภารกิจ และความอ่อนไหวของข้อมูล

4. การป้องกัน (Protection) เป็นหัวใจสำคัญในการลดความเสี่ยงจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่อาจส่งผลกระทบต่อระบบและข้อมูลของกองทัพอากาศ โดยมีการดำเนินการใน 3 องค์ประกอบ ได้แก่ การควบคุมการเข้าถึง การบริหารจัดการระบบ และการสร้างความตระหนักรู้

4.1 การควบคุมการเข้าถึง (Access Control) โดยกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลและระบบตามบทบาทและหน้าที่ ใช้การยืนยันตัวตนหลายปัจจัยเพื่อเพิ่มความปลอดภัย การจำกัดการเข้าถึงห้องศูนย์ข้อมูลหรืออุปกรณ์สำคัญเฉพาะบุคลากรที่ได้รับอนุญาต และใช้ระบบบันทึกกิจกรรม (Audit Logs) เพื่อติดตามและวิเคราะห์พฤติกรรมที่ผิดปกติ

4.2 การบริหารจัดการระบบ (System Management) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของการดำเนินงาน โดยการติดตั้งแพตช์ความปลอดภัย (Security Patches) และการอัปเดตซอฟต์แวร์อย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งโปรแกรม

ป้องกันมัลแวร์และไฟร์วอลล์ที่ทันสมัย พร้อมทั้งอัปเดตฐานข้อมูลไวรัสอย่างต่อเนื่อง และระบบตรวจจับการบุกรุก และใช้การเข้ารหัสข้อมูลสำหรับการรับส่งข้อมูลที่สำคัญ

4.3 การสร้างความตระหนักรู้ (Awareness Creation) ให้แก่บุคลากร โดยจัดอบรมบุคลากรเกี่ยวกับวิธีการป้องกันภัยคุกคาม เช่น การหลอกล่ียงฟิชซิง (Phishing) และวิธีจัดการข้อมูลอย่างปลอดภัย การฝึกซ้อมสถานการณ์จำลองการโจมตีไซเบอร์ การแจ้งเตือนภัยคุกคามใหม่ ๆ ผ่านระบบอีเมลหรือประกาศ และการสร้างความตระหนักรู้ในระดับองค์กรเพื่อให้บุคลากรเข้าใจและปฏิบัติตามนโยบายความมั่นคงปลอดภัยอย่างจริงจัง

5. การตรวจหา (Detection) เป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่มุ่งเน้นการระบุภัยคุกคามหรือเหตุการณ์ผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบและเครือข่ายขององค์กร เพื่อให้สามารถตอบสนองและแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ระบบตรวจสอบภัยคุกคาม การวิเคราะห์ข้อมูล และการแจ้งเตือน

5.1 ระบบเฝ้าสังเกตภัยคุกคาม (Threat Monitoring Systems) โดยใช้ระบบตรวจจับการบุกรุกเพื่อเฝ้าระวังและตรวจจับกิจกรรมที่ผิดปกติในเครือข่าย ระบบป้องกันการบุกรุกเพื่อเพิ่มความสามารถในการตอบสนองโดยการหยุดกิจกรรมที่เป็นอันตราย และระบบบริหารจัดการเหตุการณ์ด้านความมั่นคงปลอดภัย (Security Information and Event Management) เพื่อวิเคราะห์และตรวจจับความผิดปกติแบบเรียลไทม์

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) โดยการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลกิจกรรมเข้าออก จากเซิร์ฟเวอร์ และอุปกรณ์เครือข่าย เพื่อค้นหาความผิดปกติ การใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง และการเรียนรู้เชิงลึกในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุรูปแบบที่บ่งชี้ถึงภัยคุกคามและทำนายความเสี่ยงล่วงหน้า และการวิเคราะห์ข่าวกรองภัยคุกคามทางไซเบอร์ ฐานข้อมูลมัลแวร์หรือรายงานภัยคุกคาม เพื่อช่วยระบุภัยที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้น

5.3 การแจ้งเตือน (Alerting) โดยใช้ระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติที่สามารถแจ้งเตือนทันทีเมื่อระบบตรวจพบเหตุการณ์ผิดปกติ เช่น การพยายามเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือการโจมตี DDoS และแบ่งลำดับความสำคัญของเหตุการณ์เพื่อให้ทีมงานตอบสนองต่อภัยคุกคามที่สำคัญที่สุดก่อน รวมทั้งการแจ้งเตือนหลากหลายช่องทาง และบันทึกรายงานเหตุการณ์ที่ตรวจพบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงระบบในอนาคต

6. การตอบสนอง (Response) เป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้องค์กรสามารถจัดการกับภัยคุกคามไซเบอร์หรือเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดความเสียหายและนำไปสู่การฟื้นฟูระบบให้กลับสู่ภาวะปกติโดยเร็วที่สุด โดยมี 3 องค์ประกอบ ได้แก่ แผนตอบสนองเหตุการณ์ ทีมรับมือภัยคุกคาม และการสื่อสาร

6.1 แผนตอบสนองเหตุการณ์ (Incident Response Plan) โดยระบุขั้นตอนและกระบวนการที่ชัดเจนในการจัดการภัยคุกคามหรือเหตุการณ์ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ อย่างน้อยต้องมีขั้นตอนต่อไปนี้ การเตรียมความพร้อมในการจัดหาเครื่องมือและทรัพยากรที่จำเป็น การระบุเหตุการณ์เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบ การควบคุมและจำกัดผลกระทบ การจัดภัยคุกคาม การกู้คืนระบบ และการทบทวนเพื่อปรับปรุง

6.2 ทีมรับมือภัยคุกคาม (Cybersecurity Incident Response Team) มีหน้าที่รับผิดชอบในการตอบสนองและจัดการเหตุการณ์ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ที่ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญในด้านต่าง ๆ ได้แก่ หัวหน้าทีมทำหน้าที่ตัดสินใจและควบคุมการดำเนินงาน ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิค ผู้เชี่ยวชาญด้านกฎหมาย และผู้ประสานงาน ซึ่งบุคลากรในทีมจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาอย่างสม่ำเสมอ

6.3 การสื่อสาร (Communication) เพื่อสร้างความเข้าใจแก่ผู้เกี่ยวข้อง โดยการแจ้งให้ผู้บริหารและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทราบถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น รวมถึงความคืบหน้าในการจัดการ ประสานงานกับหน่วยงานกำกับดูแล และผู้ให้บริการเทคโนโลยี ในกรณีข้อมูลรั่วไหล ต้องแจ้งผู้ที่ได้รับผลกระทบตามข้อกำหนดทางกฎหมาย และเตรียมข้อความที่เหมาะสมสำหรับแถลงต่อสื่อและสาธารณชน เพื่อรักษาความเชื่อมั่นในองค์กร

7. การฟื้นฟู (Recovery) เป็นขั้นตอนสำคัญที่มุ่งเน้นการคืนสภาพการทำงานของระบบและข้อมูลให้กลับสู่ภาวะปกติหลังจากเกิดเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบหรือโครงสร้างพื้นฐานขององค์กร โดยมี 3 องค์ประกอบ ได้แก่ แผนกู้คืนระบบ การสำรองข้อมูล และการประเมินผลหลังเหตุการณ์

7.1 แผนกู้คืนระบบ (Disaster Recovery Plan) เป็นแผนที่กำหนดขั้นตอนและกระบวนการในการฟื้นฟูระบบที่ได้รับผลกระทบให้กลับมาทำงานได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยระบุระบบที่สำคัญที่จำเป็นต้องกู้คืนก่อน ดำเนินกระบวนการกู้คืน กำหนดกรอบเวลาที่ระบบต้องกลับมาทำงานได้ การทดสอบแผน อย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มั่นใจว่าแผนสามารถปฏิบัติได้จริง

7.2 การสำรองข้อมูล (Backup) เพื่อให้มั่นใจว่าองค์กรสามารถกู้คืนข้อมูลที่สูญหายหรือเสียหายได้อย่างรวดเร็ว โดยดำเนินการสำรองข้อมูลและทดสอบกระบวนการกู้คืนข้อมูลอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลสำรองสามารถนำกลับมาใช้ได้จริง

7.3 การประเมินผลหลังเหตุการณ์ (Post-Incident Evaluation) เพื่อให้องค์กรเรียนรู้จากเหตุการณ์ และปรับปรุงกระบวนการเพื่อป้องกันเหตุการณ์ในอนาคต โดยการวิเคราะห์เหตุการณ์เพื่อระบุสาเหตุและผลกระทบ รวบรวมบทเรียนในสิ่งที่ทำได้ดีและสิ่งที่ต้องปรับปรุง และจัดทำรายงานเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงพัฒนาแผนการฟื้นฟู

8. การปรับปรุง (Improvement) เป็นกระบวนการที่ช่วยให้องค์กรสามารถพัฒนาระบบความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นการเรียนรู้จากเหตุการณ์ที่ผ่านมาเพื่อรองรับภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ การปรับปรุงนี้ประกอบด้วย การปรับปรุงและแก้ไขปัญหา และการตรวจสอบระบบเป็นระยะ

8.1 ดำเนินการแก้ไขและปรับปรุง (Corrective Actions and Improvements) เพื่อลดความเสี่ยงและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ อ้างอิงจากบทเรียนและปัญหาที่เกิดขึ้น โดยวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา กำหนดแนวทางแก้ไข และติดตามผลการแก้ไข รวมถึงการสื่อสารเพื่อแจ้งให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องทราบถึงการปรับปรุงและแนวทางใหม่ที่กำหนดขึ้น

8.2 การตรวจสอบระบบเป็นระยะ (Periodic System Reviews) เพื่อให้องค์กรสามารถระบุช่องโหว่และปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะกลายเป็นภัยคุกคาม อาจทำโดยตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน เช่น การตั้งค่าเครือข่าย ไฟร์วอลล์ และการอัปเดตซอฟต์แวร์ การทดสอบเจาะระบบ ตรวจสอบบันทึก (Logs) เพื่อระบุพฤติกรรมที่ผิดปกติ และจัดทำตารางการตรวจสอบ เช่น รายเดือน รายไตรมาส หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบ

ทั้งนี้ กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการประเมินในประเด็น ความเหมาะสม การยอมรับ และประสิทธิภาพ จากผู้เชี่ยวชาญด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์จำนวน 8 คน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญจากกองทัพอากาศ ภาคเอกชน หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ และมหาวิทยาลัย ซึ่งผลการประเมินแสดงให้เห็นว่ากรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก มีการยอมรับอยู่ในระดับมากที่สุด และมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมาก ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินกรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ

ข้อคำถาม	ระดับการประเมิน	
1. กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ มีความเหมาะสม อยู่ในระดับใด	4.13	มาก
2. กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ มีการยอมรับ อยู่ในระดับใด	4.25	มากที่สุด
3. กรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ มีประสิทธิภาพ อยู่ในระดับใด	4.13	มาก
รวม	4.16	มาก

อภิปรายผล

ความพร้อมด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยี มีอิทธิพลเชิงบวกต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ แสดงให้เห็นว่า กองทัพอากาศจำเป็นต้องพัฒนาความพร้อมทั้ง 3 ด้านให้มีประสิทธิภาพร่วมกัน โดยความพร้อมด้านบุคลากรมีอิทธิพลมากที่สุด รองลงมาคือความพร้อมด้านกระบวนการ และความพร้อมด้านเทคโนโลยี ตามลำดับ

การสร้างตระหนักรู้และการฝึกอบรมให้แก่บุคลากร เป็นสิ่งจำเป็นที่กองทัพอากาศต้องทำเพื่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ แต่การกระทำดังกล่าวอาจยังไม่เพียงพอให้บุคลากรมีพฤติกรรมด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้ Bada et al. (2015) รายงานว่ากลยุทธ์การสร้างตระหนักรู้และการฝึกอบรมที่จะนำไปสู่พฤติกรรมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของบุคคล ได้แก่ 1) การจัดเนื้อหาการฝึกอบรมที่เข้าถึงง่าย สอดคล้องกับพฤติกรรมการปฏิบัติงานของผู้คน เพื่อให้ผู้คนยอมรับและปรับพฤติกรรม 2) การจัดเนื้อหาการฝึกอบรมต้องพิจารณาตามความสอดคล้องกับวัฒนธรรมการทำงานที่แตกต่างกันในแต่ละหน่วยงาน นอกจากนั้น การสร้างความหวาดกลัวเกี่ยวกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ให้แก่ผู้คนอาจได้ผล แต่จะส่งผลให้บุคคลมีความเครียดในการทำงานเพิ่มมากขึ้น

การเปลี่ยนผ่านรูปแบบการทำงานเข้าสู่การทำงานแบบดิจิทัลที่ทุกองค์การกำลังพัฒนาเพื่อสร้างคุณค่าที่เพิ่มขึ้นให้แก่การดำเนินงาน นำมาซึ่งความเสี่ยงด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เช่น การแลกเปลี่ยนข้อมูลสำคัญระหว่างหน่วยงานจำเป็นต้องมีมาตรการสำหรับการป้องกันการขโมยและการเข้าถึงข้อมูลดังกล่าว ดังนั้น กองทัพอากาศซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางสารสนเทศที่สำคัญต่อประเทศ จำเป็นต้องมีมาตรการในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่มีประสิทธิภาพ (Saeed et al., 2023b) เพื่อสร้างความมั่นใจว่ากระบวนการดำเนินงานในรูปแบบดิจิทัลของกองทัพอากาศปราศจากการคุกคามจากภัยคุกคามทางไซเบอร์และป้องกันการรั่วไหลของข้อมูลสำคัญ

เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและทันสมัย มีความจำเป็นต่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ สืบเนื่องจากกรณีความพร้อมด้านบุคลากรที่อาจยังไม่มีตระหนักรู้ในด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ การใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและทันสมัยจึงเป็นแนวทางการบรรเทาความเสี่ยงที่ดี กองทัพอากาศอาจต้องลงทุนในด้าน

เทคโนโลยีการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เช่น การเรียนรู้ของเครื่อง และปัญญาประดิษฐ์ ควบคู่ไปกับการฝึกอบรมบุคลากรให้สามารถใช้งานเครื่องมือดังกล่าวเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ลงได้ (Annarelli et al., 2020)

นอกจากนี้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าความพร้อมด้านเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างความพร้อมด้านกระบวนการให้มีความแข็งแกร่งยิ่งขึ้น อีกทั้ง เมื่อความพร้อมด้านกระบวนการได้รับการพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพที่ดีจะส่งผลต่อความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการลงทุนและพัฒนาเทคโนโลยีควบคู่กับการปรับปรุงกระบวนการเพื่อสร้างรากฐานที่มั่นคงต่อการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2021) ที่ชี้ให้เห็นว่าการลงทุนในเทคโนโลยีด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์นั้น จะช่วยลดความเสี่ยงเชิงระบบขององค์กร อีกทั้งยังสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้รับบริการว่าองค์กรมีความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ด้วย

การพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ เพื่อบรรเทาความเสี่ยงจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ จำเป็นต้องพัฒนาความพร้อมใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ ความพร้อมด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่งความพร้อมด้านบุคลากรที่ต้องสร้างความตระหนักรู้และทักษะด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ให้ทั่วถึงภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงรูปแบบการโจมตีอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งบุคลากรที่มีทักษะด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ (Hasan et al., 2021) การลงทุนในด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์ ที่ต้องดำเนินไปควบคู่กับการฝึกอบรมบุคลากรให้มีทักษะในการใช้เทคโนโลยีขั้นสูง โดยกองทัพอากาศต้องบริหารจัดการเนื้อหาอบรมให้เหมาะสมกับพฤติกรรม การปฏิบัติงานที่แตกต่างกันของแต่ละหน่วยงาน เพื่อบุคลากรได้รับความรู้และทักษะในการใช้เทคโนโลยีที่ลงทุนไปสำหรับป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้อย่างเต็มที่ (Neri et al., 2024)

นอกจากนั้น การเปลี่ยนผ่านทางดิจิทัลได้เพิ่มความเสี่ยงทางไซเบอร์ให้กับกองทัพอากาศในกระบวนการทำงานซึ่งครอบคลุมในทุกมิติที่มีการใช้เทคโนโลยีดิจิทัล การใช้มาตรการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่เชื่อถือได้จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการบรรเทาความเสี่ยงทางไซเบอร์ เช่น การใช้ระบบข่าวกรองภัยคุกคามทางไซเบอร์ (Cyber Threat Intelligent) เพื่อแบ่งปันข้อมูลภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่ทันต่อเหตุการณ์และเชื่อถือได้ให้หน่วยงานภายในนำไปใช้ และมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับหน่วยงานภายนอกอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงมีการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบที่ผู้คนเข้าใจได้ง่าย (Saeed et al., 2023a) จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อีกทั้ง กองทัพอากาศเป็นหน่วยงานภาครัฐที่มีความสำคัญยิ่งต่อประเทศ จึงตกเป็นเป้าหมายการโจมตีของผู้ร้ายทางไซเบอร์ที่ต้องการเข้าถึงข้อมูลสำคัญ ทดสอบความสามารถของตนเอง ทำลายชื่อเสียงของกองทัพเพื่อวัตถุประสงค์ใด ๆ ดังนั้น การพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในด้านบุคลากร กระบวนการ และเทคโนโลยีอาจไม่เพียงพอต่อการหลีกเลี่ยงภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้ กองทัพอากาศจำเป็นต้องพิจารณากลยุทธ์ในด้านอื่นด้วย เช่น การพัฒนารอบการประเมินความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ ดังงานวิจัยของ Cheang (2009) ที่เสนอกรอบการประเมินความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่มีจำนวน 46 ตัวชี้วัด ครอบคลุมใน 3 ด้าน ได้แก่ บุคลากร โครงสร้างพื้นฐาน และสภาพแวดล้อม

สำหรับประเมินความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของหน่วยงานภาครัฐในประเทศกำลังพัฒนา เพื่อให้หน่วยงานทราบถึงจุดแข็งและจุดอ่อนของตนเอง ซึ่งจะช่วยให้กำหนดกลยุทธ์ในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างครอบคลุม และ Georgiadou et al. (2021) เสนอกรอบการประเมินการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์บนพื้นฐาน MITRE ATTandCK (Adversarial Tactics, Techniques, and Common Knowledge) ที่ครอบคลุมในด้านการดำเนินงานขององค์กรและบุคลากร โดยมุ่งเน้นไปที่การรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ เทคโนโลยีดิจิทัล และเทคโนโลยีดำเนินงาน (Operational Technology)

อย่างไรก็ตาม เราจะพบว่า การพัฒนากรอบการประเมินความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ตามที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่านักวิจัยได้ให้ความสำคัญในด้านบุคลากรเป็นอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น การกำหนดมาตรการการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์อาจไม่สามารถบังคับให้บุคลากรปฏิบัติตามมาตรการได้ ทำให้ยังมีช่องโหว่จากความผิดพลาดของบุคลากร (Pollini et al., 2022) ดังนั้น การพัฒนาขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศจึงจำเป็นต้องมีมาตรการที่ครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลยุทธ์ในการพัฒนาความพร้อมด้านบุคลากรและกระบวนการ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอกรอบการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับกองทัพอากาศ เพื่อเสริมสร้างความแข็งแกร่งและความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่ครอบคลุมกระบวนการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องในกรณีที่เกิดเหตุการณ์โจมตีทางไซเบอร์

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

ผลการวิจัยฉบับนี้ พบว่า ปัจจัยด้านบุคลากรมีความสำคัญยิ่งต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การพัฒนาความสามารถในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของกองทัพอากาศ จึงควรให้ความสำคัญในการพัฒนาบุคลากรทั้งในด้านความตระหนักรู้และทักษะในด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งถัดไป

การวิจัยในครั้งถัดไปควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ เช่น ผลกระทบจากวัฒนธรรมองค์กรในด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ และผลกระทบจากการใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ได้แก่ การเรียนรู้ของเครื่องและปัญญาประดิษฐ์ในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Royal Thai Air Force. (2020). *Royal Thai Air Force Strategy for 20 years (2018 - 2037) (Revised edition 2020)*.

[Online]. Retrieved from: [https://welcome-page.raf.mi.th/blog/e-ksaarephyaeprh-](https://welcome-page.raf.mi.th/blog/e-ksaarephyaeprh-11/yuththsaatrkgngthaph-aakaas-20-pii-ph-s-2561-2580-38)

11/yuththsaatrkgngthaph-aakaas-20-pii-ph-s-2561-2580-38. (in Thai)

- Laohhapaibon, P., and Kongwut, O. (2024). Integrating Artificial Intelligence (AI) and Artificial General Intelligence (AGI) to Enhance the Cybersecurity System of the Royal Thai Air Force's Cyber Center. *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 20(1), 131-140.
- Annarelli, A., Nonino, F., and Palombi, G. (2020). Understanding the management of cyber resilient systems. *Computers and Industrial Engineering*, 149, 106829.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106829>
- Bada, M., Sasse, A. M., and Nurse, J. R. C. (2015). Cyber security awareness campaigns: Why do they fail to change behaviour? Presented at the *International Conference on Cyber Security for Sustainable Society (CSSS)*.
- Berlilana, Noparumpa, T., Ruangkanjanases, A., Hariguna, T., and Sarmini. (2021). Organization benefit as an outcome of organizational security adoption: The role of cyber security readiness and technology readiness. *Sustainability*, 13(24), 13761.
<https://doi.org/10.3390/su132413761>
- Borgman, B., Mubarak, S., and Choo, K. K. R. (2015). Cyber security readiness in the South Australian Government. *Computer Standards and Interfaces*, 37, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.csi.2014.06.002>
- Cheang, S. (2009). Conceptual model for cybersecurity readiness assessment for public institutions in developing country: Cambodia. *The Proceedings of the 2009 Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology*, 1411-1418.
<https://doi.org/10.1109/ICCIT.2009.242>
- Eilts, D. (2020). *An Empirical Assessment of Cybersecurity Readiness and An Empirical Assessment of Cybersecurity Readiness and Resilience in Small Businesses Resilience in Small Businesses*. [Online]. Retrieved from: https://nsuworks.nova.edu/gscis_etd
- Fornell, C., and Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39-50.
<https://doi.org/10.2307/3151312>
- Georgiadou, A., Mouzakitis, S., and Askounis, D. (2021). Assessing MITRE ATTandCK risk using a cybersecurity culture framework. *Sensors*, 21(9), 3267. <https://doi.org/10.3390/s21093267>
- Hair, J. F., Anderson, R. E., and Black, W. C. (2014). *Multivariate data analysis*. 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Hasan, S., Ali, M., Kurnia, S., and Thurasamy, R. (2021). Evaluating the cyber security readiness of organizations and its influence on performance. *Journal of Information Security and Applications*, 58, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2020.102726>

- International Organization for Standardization. (2022). *ISO/IEC 27001:2022 - Information security, cybersecurity and privacy protection - Information security management systems - Requirements*. International Organization for Standardization. [Online]. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/82875.html>
- Leavitt, H. J. (1965). Applied organisational change in industry: Structural, technological and humanistic approaches. In J. G. March (Ed.), *Handbook of organisation*. Rand McNally and Company. Chicago, Illinois.
- National Institute of Standards and Technology. (2018). *Framework for improving critical infrastructure cybersecurity* (Version 1.1). U.S.: Department of Commerce. <https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.04162018>
- Neri, M., Niccolini, F., and Martino, L. (2024). Organizational cybersecurity readiness in the ICT sector: A quanti-qualitative assessment. *Information and Computer Security*, 32(1), 38-52. <https://doi.org/10.1108/ICS-05-2023-0084>
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Pollini, A., Callari, T. C., Tedeschi, A., Ruscio, D., Save, L., Chiarugi, F., and Guerri, D. (2022). Leveraging human factors in cybersecurity: An integrated methodological approach. *Cognition, Technology and Work*, 24(3), 371-390. <https://doi.org/10.1007/s10111-021-00683-y>
- Saeed, S., Altamimi, S. A., Alkayyal, N. A., Alshehri, E., and Alabbad, D. A. (2023b). Digital transformation and cybersecurity challenges for businesses resilience: Issues and recommendations. *Sensors*, 23(15), 6666. <https://doi.org/10.3390/s23156666>
- Saeed, S., Suayyid, S. A., Al-Ghamdi, M. S., Al-Muhaisen, H., and Almuhaideb, A. M. (2023a). A systematic literature review on cyber threat intelligence for organizational cybersecurity resilience. *Sensors*, 23(16), 7273. <https://doi.org/10.3390/s23167273>
- Sherwood, J., Clark, A., and Lynas, D. (2005). *Enterprise security architecture: A business-driven approach*. CRC Press.
- Zhang, Y., Zhang, C., and Xu, Y. (2021). Effect of data privacy and security investment on the value of big data firms. *Decision Support Systems*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113543>

การศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนโครงสร้างอาคาร ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ: กรณีศึกษา บ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน

ภัทร์ แผนสมบูรณ์¹, ศุภรัชชัย วรรัตน์^{1*}, สุรศักดิ์ จันฉาย², ประยุทธ์ ฤทธิเดช¹, ณัฐฐ์ นาคร³

¹หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

²บริษัท เอ-เวสต์ พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด

³การประสานงานภูมิภาคสาขาพญา (ชั้นพิเศษ) ชลบุรี

Received: 9 January 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 30 May 2025

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันเกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจกซึ่งภาคการก่อสร้างและงานอาคารมีส่วนการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 37% ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด หากสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการก่อสร้างได้จะสามารถลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญจึงได้ทำการศึกษาและทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านพักอาศัยจากชนิดวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ คอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ โดยใช้โครงสร้างบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการออกแบบบ้านพักอาศัยที่สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุด จากผลการวิจัยพบว่าบ้านโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำสุดที่ 583.61 kgCO₂eq/m² รองลงมาคือบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ 620.82 kgCO₂eq/m² และบ้านโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูงที่สุด 680.80 kgCO₂eq/m² เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างบ้านคอนกรีตเสริมเหล็กกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ พบว่าสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้ถึง 14.28% และ 6% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บ้านประหยัดพลังงาน คอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ เหล็กรูปพรรณ

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: vorarat@dpu.ac.th

Comparing The Carbon Dioxide Emissions from Residential Building Structures with Reinforced Concrete, Wood, and Steel Profiles: A Case Study of The D.D. Rakfa 4 House of The Ministry of Energy

Pat Phansomboon¹, Suparatchai Vorarat^{1,*}, Surasak Janchai²,
Prayuth Rittidatch¹, Nat Nakkorn³

¹Graduate Program in Engineering Management,
College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University

²A-West Property Co., Ltd

³Provincial Waterworks Authority, Branch Office Pattaya (Special Level)

Received: 9 January 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 30 May 2025

Abstract

The accumulation of greenhouse gases is the cause of current climate change, with the construction and building sector accounting for 37% of total greenhouse gas emissions. Reducing greenhouse gas emissions from the construction sector can mitigate the impact of climate change. Realizing the importance of this, the researchers conducted a study comparing the carbon dioxide (CO₂) emissions of residential structures made of three different construction materials: reinforced concrete, wood, and steel. They used the D.D. Rak Fah 4 house structure from the Ministry of Energy. The study's objective was to compare the carbon dioxide (CO₂) emissions of various construction materials, aiming to design residential houses that can reduce CO₂ emissions as much as possible. The results of the research found that wooden-structured houses had the lowest carbon dioxide (CO₂) emissions at 583.61 kgCO₂eq/m², followed by steel-structured houses at 620.82 kgCO₂eq/m², and reinforced concrete-structured houses had the highest at 680.80 kgCO₂eq/m² when comparing reinforced concrete structures with wood and steel structures. The study revealed that it could decrease carbon dioxide (CO₂) emissions by 14.28% and 6%, respectively.

Keywords: CO₂ Emissions, Energy-saving House, Reinforced Concrete, Wood, Steel Structure

*Corresponding Author; E-mail: vorarat@dpu.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการสะสมของก๊าซเรือนกระจกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก (Climate Change) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบกับการใช้ชีวิตของคนทั่วโลก (Acen et al., 2024) 193 ประเทศในนามสมาชิกสหประชาชาติร่วมกันตกลงประกาศเป้าหมายเกี่ยวกับการลดผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศ (Climate Action) ซึ่งเป็นหนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ขององค์การสหประชาชาติทั้งหมด 17 ข้อ หรือ SDGs 17 (Wallengren et al., 2024) เพื่อให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นในอนาคตลดลง รายงานล่าสุดขององค์การสหประชาชาติ The Sustainable development goals report special edition. ปี ค.ศ. 2023 พบว่าการดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลกยังไม่เพียงพอและไม่รวดเร็วพอที่จะแก้ไขปัญหาเพื่อให้บรรลุเป้าหมายการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่ง ภายในปี ค.ศ. 2030 เพื่อให้บรรลุเป้าหมายการจำกัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 1.5 °C (UNSD, 2020) จากข้อมูลขององค์การสหประชาชาติพบว่า ภาคการก่อสร้างและงานอาคารปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) คิดเป็น 37% (United Nations Environment Program (2024) Building Materials and the Climate: Constructing a New Future) คิดเป็น 1 ใน 3 ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นทั้งหมด (UNEP, 2024) ดังนั้นการลดผลกระทบจากภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งพบว่ามิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้างเกิดขึ้นมากมาย เริ่มตั้งแต่การออกแบบ การคัดเลือกวัสดุ การขนส่ง การก่อสร้าง การกำจัดของเสีย การลดของเสีย การลดปริมาณวัสดุที่ใช้ การลดปริมาณแรงงาน การลดการใช้น้ำ การลดการใช้ไฟฟ้าของทั้งกระบวนการก่อสร้าง รวมทั้งได้มีการศึกษาถึงการใช้งานตัวอาคารจนถึงจุดสิ้นสุดคือการรื้อถอนหรือการนำมาใช้ใหม่ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างกันไปในสภาวะหรือสถานที่ที่แตกต่างกัน (Ghafoor et al., 2024) เช่น ความแตกต่างของสภาพอากาศที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจากการใช้งานอาคารโดยใช้ชนิดพลังงานที่แตกต่างกัน ความแตกต่างด้านสถานที่ก่อสร้างทำให้ความเหมาะสมของการนำวัสดุมาใช้แตกต่างกันไปด้วย เช่น ชนิดของไม้ที่จะนำมาใช้ก่อสร้างของทางยุโรปเหนือก็จะแตกต่างจากทางเอเชียเหนือหรือเอเชียใต้หรือที่อื่น ๆ เป็นต้น (Syngros et al., 2017) ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างมีผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยตรง ดังนั้นการเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นจากวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกันจึงมีความน่าสนใจ โดยได้มีการศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากชนิดวัสดุและชนิดของอาคารที่แตกต่างกันในหลายประเทศ ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์กับประเทศไทยและโลกในแง่การลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้าง จึงควรศึกษาถึงความแตกต่างของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของวัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน

จากการทบทวนวรรณกรรม เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในการก่อสร้างจากวัสดุที่ต่างชนิดกัน พบว่ามิงงานวิจัยเกิดขึ้นหลากหลายโดยแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันออกไปทั้งเรื่องของสถานที่ วัสดุที่นำมาเปรียบเทียบ ขนาด และประโยชน์ใช้สอยของอาคาร กรอบระยะเวลาวงจรชีวิต (life cycle) และมาตรฐานที่นำมาใช้อ้างอิง จากงานวิจัยการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก กับอาคารที่ใช้ไม้ชนิด cross-laminated timber (CLT) และอาคารที่ใช้โครงสร้างผสมกัน (hybrid) ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและ CLT ของอาคารสูง 11 ชั้น พบว่าอาคาร CLT และ hybrid CLT มีการปลดปล่อย

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่ำกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 15% และ 10.77% ตามลำดับ (Duan et al., 2022) การเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และ CLT อาคารสูง 8 ชั้น จำนวน 3 สถานที่ใน Australia คือ Melbourne Sydney และ Brisbane พบว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของอาคาร CLT น้อยกว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ Melbourne Sydney และ Brisbane 30%, 34% และ 29% ตามลำดับ (Jayalath et al., 2020) และพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัย (Duan et al., 2022) แต่ในการศึกษาวิจัยที่ภูฏานได้เปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อาคารสูง 4 ชั้น ระหว่าง คอนกรีตเสริมเหล็กกับอาคารไม้ พบว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของอาคารไม้ต่ำกว่าอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กถึง 111% โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาในช่วง product stage และ construction process stage (EN 15978:2011) เท่านั้น ไม่ได้พิจารณาครบหมดทั้งวงจรชีวิต (Thinley and Hengrasmee, 2023) ส่วนงานวิจัยที่เกิดขึ้นที่ North America ได้เปรียบเทียบอาคารโครงสร้างไม้กับอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของอาคารสูง 5 ชั้น และ 12 ชั้น พบว่าอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มากกว่าอาคารไม้ 31% และ 41% ตามลำดับ (Allan and Phillips.,2021) และยังมีงานวิจัยที่ประเทศสเปน ได้ศึกษาบ้านพักอาศัย เดี่ยวพื้นที่ใช้สอย 247 m^2 โดยเป็นบ้านโครงสร้างไม้ CLT ทั้งหมด พบว่ามีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมกับการใช้พลังงานเป็นจำนวน 34 $\text{kg CO}_2 \text{ equivalent/m}^2/\text{year}$ แต่ในส่วนของโครงสร้างไม้ CLT มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพียง 2.8 $\text{kg CO}_2 \text{ equivalent/m}^2/\text{year}$ (Lechón et al., 2021)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของอาคาร ที่มีขนาด ความสูง และชนิดการใช้งานรวมทั้งวัสดุก่อสร้างอาคารที่ต่างชนิดกันในประเทศ ซึ่งพบว่าผลการวิจัยที่ได้จากสถานที่และขนาดพื้นที่ที่แตกต่างกันออกไปนั้น มีผลทำให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แตกต่างกันไป ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจเรื่องการเปรียบเทียบชนิดวัสดุการก่อสร้างที่แตกต่างกันในประเทศไทย ซึ่งในบทความนี้จะใช้แบบบ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (พ.พ.) แบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 (Ministry of Energy, 2022) เป็นแนวทางในการศึกษาการเปรียบเทียบการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของอาคารในประเทศไทยซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่น่าสนใจไปพัฒนาให้เกิดการวางแผน การออกแบบการใช้วัสดุก่อสร้างบ้านพักอาศัยเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และช่วยลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สอดคล้องตามแผนปฏิบัติการ 5 ปี (พ.ศ. 2566 - 2570) ของกรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าเป้าหมายในปี พ.ศ. 2570 ที่จะลด การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลง 20% เมื่อเทียบกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในกรณีปกติ (Ministry of Natural Resources and Environment, 2023).

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของวัสดุโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน แบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4
2. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของโครงสร้างบ้านประหยัด พลังงาน 3 ชนิด ระหว่างโครงสร้างบ้านเดิมคือคอนกรีตเสริมเหล็ก เปรียบเทียบกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรมสร้างแบบจำลองและออกแบบโครงสร้างบ้าน

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Midas Gen (Hu et al., 2012) ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยออกแบบโครงสร้างอาคารที่ใช้อย่างแพร่หลายเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบอาคารเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบอาคาร เช่น อาคาร Burj Khalifa ที่ดูไบ ประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์, อาคาร National stadium หรือ Bird nest ของประเทศจีน เป็นต้น ผู้วิจัยได้นำโปรแกรมนี้มาช่วยสร้างแบบจำลองโครงสร้าง วิเคราะห์โครงสร้าง และออกแบบขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กgrupพรรณที่ใช้ในแบบจำลอง รวมทั้งหาปริมาณของวัสดุในแบบจำลอง โดยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ทำการใส่ข้อมูลน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการออกแบบลงไปตำแหน่งโครงสร้างต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างหาแรงกระทำที่เกิดขึ้น (Yin et al., 2019) จากนั้นเริ่มออกแบบโดยการเลือกชนิดและขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนให้เหมาะสม ทำการเลือกขนาดของชิ้นส่วนจนได้ขนาดชิ้นส่วนที่แข็งแรงเพียงพอและเหมาะสมเมื่อได้ขนาดที่ต้องการแล้วโปรแกรมจะทำการคำนวณหาปริมาณวัสดุออกมา

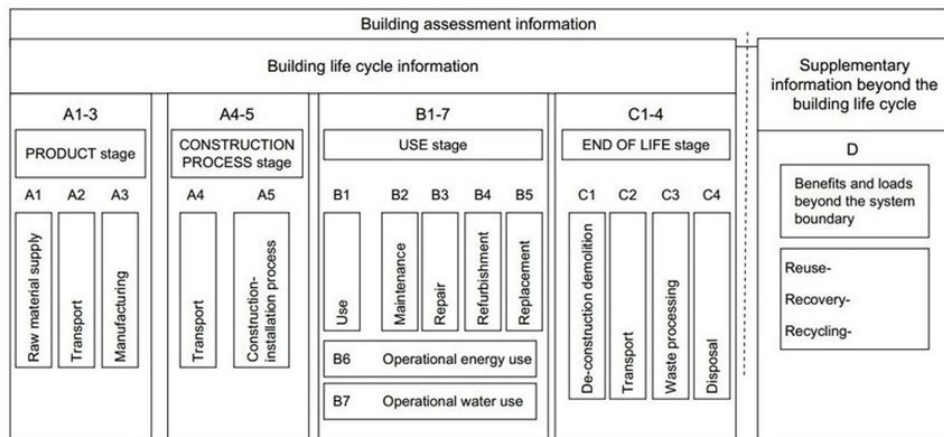
บ้านประหยัดพลังงาน

บ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของกระทรวงพลังงาน (พพ.) (Ministry of Energy, 2022) คือ แบบบ้านที่ได้รับการออกแบบจากความร่วมมือของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานของกระทรวงพลังงาน (พพ.) โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะให้ประชาชนได้เข้าใจ และเกิดความเชื่อมั่นในแนวคิดเรื่องบ้านประหยัดพลังงานที่สามารถทำได้จริงและเกิดผลลัพธ์การประหยัดพลังงานอย่างเป็นรูปธรรม สามารถก่อสร้างและอยู่อาศัยได้อย่างสุขสบาย โดยมีแนวความคิดหลักในการออกแบบ (Ascione et al., 2019; Chang et al., 2023; Irfan Sadaq et al., 2023) ดังนี้ 1) การลดพลังงานพื้นฐาน โดยการพยายามปิดบังแสงแดดที่จะส่องเข้าตัวบ้านในช่วงเวลา 9.00 – 15.00 น. 2) การออกแบบพื้นที่ภายในบ้านแยกส่วนตามการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน โดยออกแบบให้ห้องที่ต้องใช้เครื่องปรับอากาศอยู่ด้านในสุดหรือได้รับการปกป้องจากความร้อนภายนอกให้มากที่สุด 3) การออกแบบหลังคาลาดเอียง 20° และแยกส่วนโครงสร้าง เพื่อทำการติดตั้งแผงพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ 4) การเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ในท้องตลาดทั่วไปเป็นหลักเพื่อให้ประชาชนและช่างท้องถิ่นในประเทศไทยสามารถก่อสร้างหรือติดตั้งได้อย่างสะดวก

การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่แตกต่างกัน โดยการออกแบบต้องเป็นไปตามการคำนวณโครงสร้างของวิศวกรออกแบบ ในส่วนฐานรากอาคารโครงสร้างไม่จำเป็นต้องออกแบบโดยไม่มีการใช้เสาเข็มรองรับน้ำหนักเนื่องจากใช้การออกแบบเป็นฐานรากแบบแผ่ได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กgrupพรรณมีน้ำหนักวัสดุมากกว่าจึงออกแบบฐานรากแบบมีเสาเข็ม โดยพบว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วน of วัสดุโครงสร้างจะมีสัดส่วนเป็น 47.81% ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของบ้าน (Sangsawang et al., 2014)

ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Factor of Material) (TGO, 2023) คือ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นตัวเลขอ้างอิงสำหรับการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิดต่อไปการหาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุก่อสร้างในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment – LCA) ตามมาตรฐาน EN 15978 โดยแบ่งช่วงวงจรชีวิตหลัก ๆ คือ Product stage,

Construction Process stage, Use stage และ End of life stage โดยทำการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของวัสดุที่นำมาใช้ การขนส่งมาผลิต การผลิต การขนส่งไปยังหน่วยงานก่อสร้าง การก่อสร้าง การใช้งานอาคาร และการรื้อถอนทำลาย (European Committee for Standardization, 2011) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Building's LCA stages according to EN 15978
(European Committee for Standardization, 2011)

วิธีการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สามารถทำได้โดยการนำปริมาณซึ่งมีหน่วยเป็นหนึ่งหน่วยปริมาณของวัสดุที่ต้องการหาค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุนั้น (TGO, 2023) ดังสมการที่ (1)

$$CO_2 = M_i \times E_f \quad (1)$$

โดยที่

CO₂ คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีหน่วยเป็น kgCO₂eq

M_i คือปริมาณของวัสดุที่ต้องการหาค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาณของวัสดุแต่ละชนิด

E_f คือค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น kgCO₂eq ต่อ 1 หน่วยปริมาณวัสดุ โดยวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่า E_f แตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด

รายการวัสดุ	หน่วย (unit)	ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซ CO ₂ (kgCO ₂ eq per unit)
เสาเข็มตอก	m ³	273
ทรายหยาบ	kg	0.0037
คอนกรีตหยาบ	m ³	212
คอนกรีตโครงสร้าง	m ³	239
พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป	m ³	482
ไม้แบบ	m ³	547
เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต	kg	0.77
เหล็กรูปพรรณ ขึ้นรูปร้อน	kg	0.69
เหล็กรูปพรรณ ขึ้นรูปเย็น	kg	2.21
ไม้เนื้อแข็ง	kg	0.47
ลวดผูกเหล็ก ตะปู	kg	0.21

กรอบแนวคิดในการวิจัย

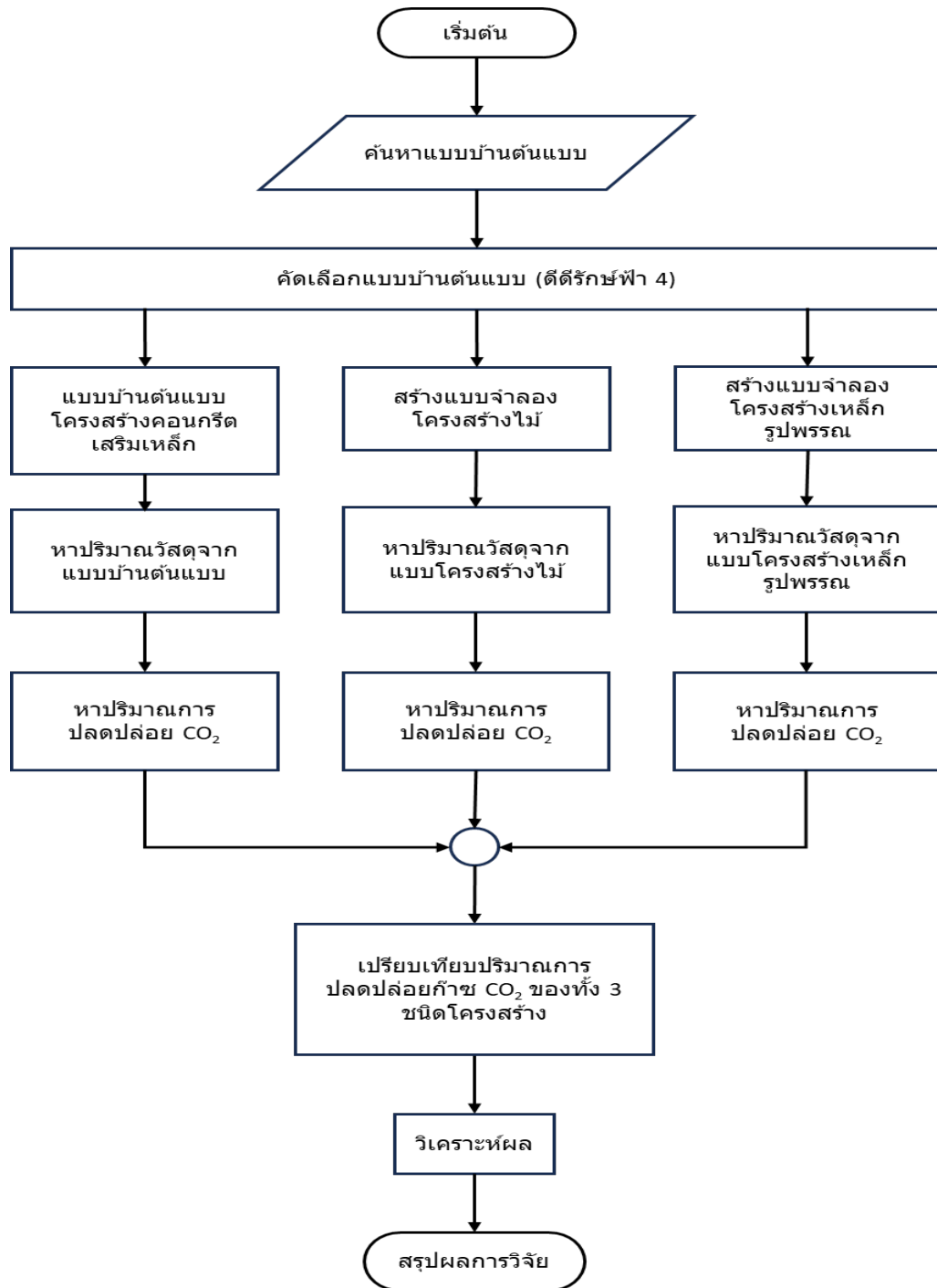
ผู้วิจัยได้ใช้แบบบ้านประหยัดพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) มาใช้ในการศึกษาวิจัย จากแบบบ้านของ พพ. ทั้งหมด 12 แบบ ผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านดีตริกรัฟฟา 4 นำมาเป็นแบบบ้านต้นแบบเพื่อทำการวิจัยเพราะเป็นแบบบ้านที่นิยมสร้างสำหรับสังคมเมือง มีพื้นที่ใช้สอย 161 m² ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นตัวแทนบ้านส่วนใหญ่ในเขตชุมชนเมืองปัจจุบัน โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะโครงสร้างของอาคารเท่านั้น ประกอบด้วยเสาเข็ม ฐานราก ตอม่อ คานคอดิน เสา คานชั้น 2 เสาชั้น 2 คานรับหลังคา โดยจะยังคงพิจารณาส่วนประกอบอื่น ๆ ของอาคารไว้ตามเดิม เพื่อไม่ให้กระทบกับแนวคิดและประสิทธิภาพของการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงานของแบบบ้านประหยัดพลังงานต้นแบบ และเพื่อให้สามารถใช้งานอาคารในเชิงโครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลงไป แม้ชนิดของโครงสร้างจะถูกเปลี่ยนแปลงจากคอนกรีตเสริมเหล็กไปเป็นไม้และเหล็กรูปพรรณ ดังนั้น น้ำหนักจรรยาที่ใช้ในการออกแบบตัวโครงสร้างของอาคารต้องคงที่เท่ากัน (Costa and Beck., 2024) ดังนี้

- 1) น้ำหนักบรรทุกจรพื้นที่หลังคา 50 kg/m²
- 2) น้ำหนักบรรทุกจรทั่วไป 150 kg/m²
- 3) น้ำหนักบรรทุกจรที่จอดรถ 400 kg/m²
- 4) น้ำหนักบรรทุกจรส่วนเพิ่มเติม 120 kg/m²
- 5) แรงลมที่กระทำกับตัวบ้าน 50 kg/m²

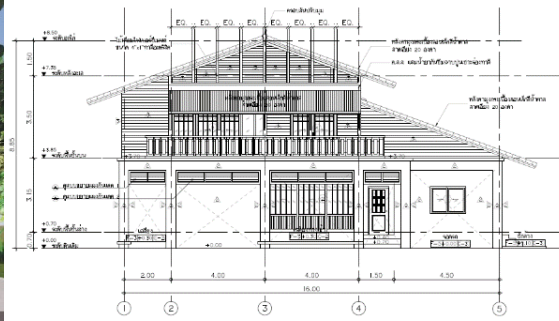
จากนั้นทำการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในช่วงชีวิต Product Stage คือการพิจารณาจากส่วนของวัสดุก่อสร้างเท่านั้นของโครงสร้างต้นแบบคือคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เริ่มต้นโดยผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบบ้านจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (พพ.) คือแบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 จากนั้นทำตามขั้นตอนดังภาพที่ 2 เมื่อได้แบบบ้านต้นแบบ บ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 เป็นบ้าน 2 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอยรวม 161 m² โครงสร้างบ้านเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นหนึ่งในแบบบ้านประหยัดพลังงาน แบบบ้านดีดี (DEDE) รักษาพลังงานของกระทรวงพลังงาน ดังภาพที่ 3 แสดงแบบบ้านและแบบแปลนงานสถาปัตยกรรมของบ้านตัวอย่าง และภาพที่ 4 แสดงแบบแปลนพื้นที่ใช้สอยบ้านตัวอย่างชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโครงสร้างบ้านใหม่ โดยเปลี่ยนชนิดโครงสร้างจากแบบบ้านต้นแบบที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเปลี่ยนเป็นโครงสร้างไม้ ดังภาพที่ 5 (ก) และโครงสร้างเหล็กgrupพรรณ ดังภาพที่ 5 (ข) โดยยังคงใช้ค่าความต้องการการใช้งาน (function) ของการใช้อาคารที่เหมือนเดิมคืออาคารต้องรองรับน้ำหนักจร รองรับแรงลม ที่มากกระทำได้เท่าเดิม และไม่เปลี่ยนแปลงส่วนประกอบอื่นของอาคาร เช่น ขนาดห้อง ชนิดแผ่นหลังคา ชนิดผนัง ชนิดพื้น จากนั้นทำการถอดแบบหาปริมาณวัสดุที่ใช้เพื่อการก่อสร้างโครงสร้างของแต่ละแบบ ได้แก่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างไม้ และโครงสร้างเหล็กgrupพรรณ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิดจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (TGO, 2023) และ Inventory of Carbon and Energy, University of Bath (Hammond and Jones, 2008) มาคูณด้วยปริมาณวัสดุ ดังสมการที่ (1)



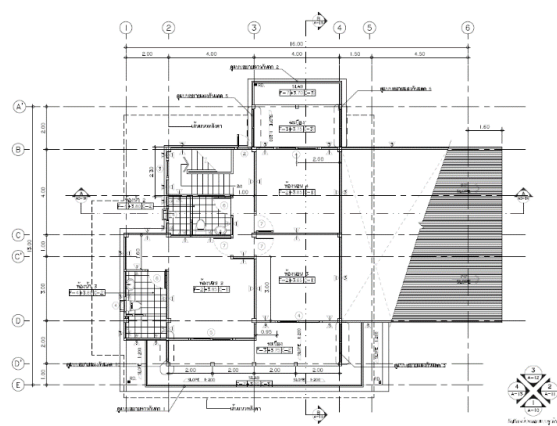
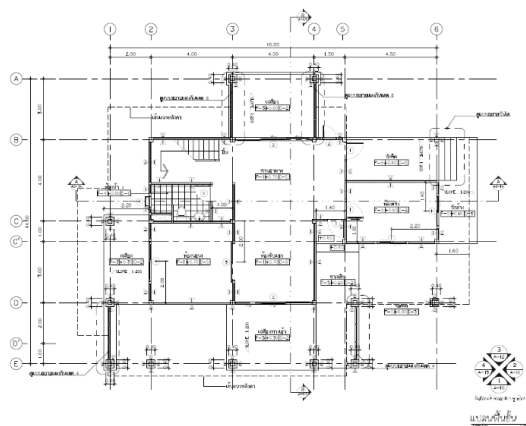
ภาพที่ 2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย



(ก) ตัวอย่างบ้านประหยัดพลังงาน

(ข) แบบแปลนงานสถาปัตยกรรม

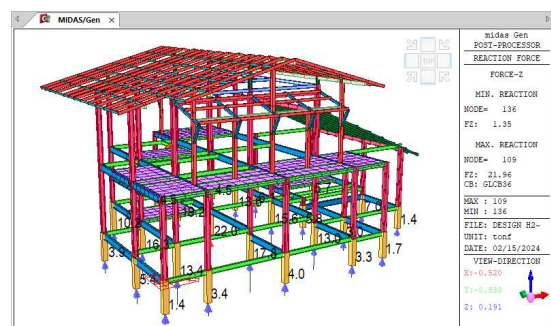
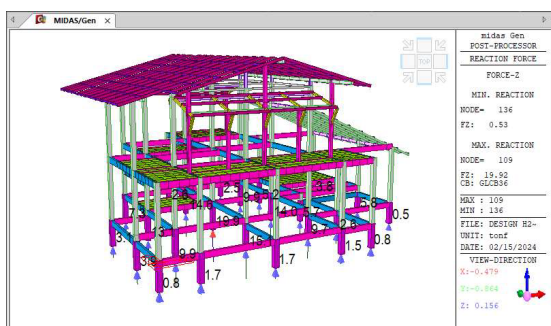
ภาพที่ 3 แบบบ้านประหยัดพลังงานบ้านดีศรีรักษ์ฟ้า 4 (Ministry of Energy, 2022)



(ก) แบบแปลนพื้นที่ 1

(ข) แบบแปลนพื้นที่ 2

ภาพที่ 4 แบบแปลนบ้านตัวอย่างพื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 (Ministry of Energy, 2022)



(ก) แบบแปลนจำลองบ้านโครงสร้างไม้

(ข) แบบแปลนจำลองบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

ภาพที่ 5 แบบแปลนจากจำลองบ้านโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

โดยที่กรอบการพิจารณาของงานวิจัยจะอยู่ในช่วง Product Stage คือการพิจารณาจากส่วนของวัสดุ ก่อสร้างเท่านั้น เมื่อได้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างแบบบ้านแต่ละชนิดแล้ว นำมาพิจารณาเปรียบเทียบตามขั้นตอนต่อไป

ผลการวิจัย

จากงานวิจัยการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน ระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ โดยการเปลี่ยนชนิดวัสดุที่นำมาใช้สร้างโครงสร้างบ้าน จากเดิมที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนำมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยที่ยังคงสามารถใช้งานอาคารได้เหมือนเดิม โดยมีปริมาณวัสดุหลัก แสดงดังตารางที่ 2 และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ส่วนของโครงสร้างบ้าน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณวัสดุหลักของโครงสร้างบ้าน

รายการวัสดุ	หน่วย	ปริมาณวัสดุ		
		คอนกรีตเสริมเหล็ก	ไม้	เหล็กรูปพรรณ
เสาเข็มตอก	m ³	12.10	-	15.78
ทรายหยาบ	kg	6.09	8.03	4.28
คอนกรีตหยาบ	m ³	2.99	4.42	2.12
คอนกรีตโครงสร้าง	m ³	70.04	33.58	27.09
ไม้แบบ	m ³	12.71	2.53	2.51
เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต	kg	8,195.23	3,634.49	3,398.93
เหล็กรูปพรรณ เสา คาน	kg	5,348.19	4,822.80	17,699.87
สีกันสนิม	m ²	213.79	213.79	664.66
ไม้เนื้อแข็ง	kg	-	564.80	-
อื่น ๆ เช่น ลวดผูกเหล็ก ตะปู	kg	411.46	136.14	128.68

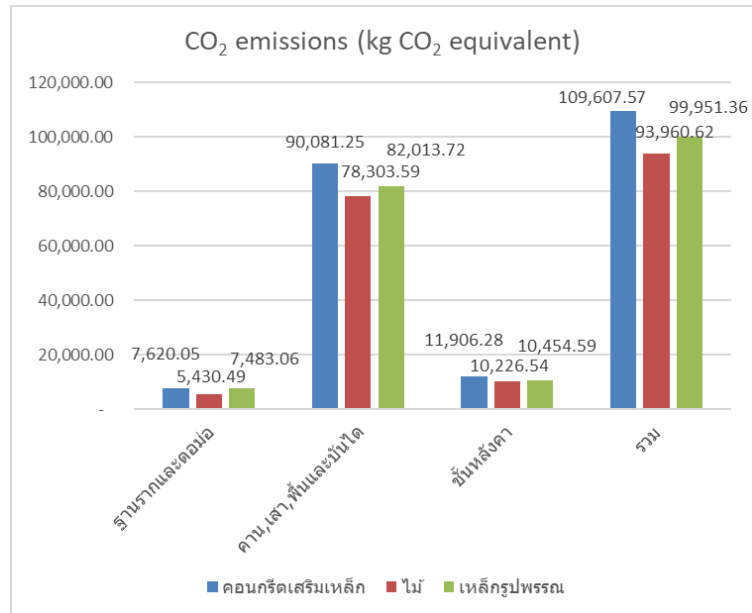
จากตารางที่ 2 แสดงปริมาณของวัสดุหลักของโครงสร้างบ้านแต่ละชนิด โดยพบว่าบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีปริมาณคอนกรีตโครงสร้าง 70.04 m³ แต่โครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็กมีปริมาณคอนกรีตโครงสร้างเพียง 33.58 m³ และ 27.09 m³ ตามลำดับ ปริมาณเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตของบ้านชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคือ 8,195.23 kg มากกว่าของโครงสร้างบ้านชนิดไม้และชนิดเหล็กรูปพรรณที่มีปริมาณเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต 3,634.49 kg และ 3,398.93 kg ตามลำดับ ปริมาณเสาเข็มของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กคือ 12.10 m³ และ 15.78 m³ ตามลำดับ แต่โครงสร้างไม้จะไม่มีการใช้เสาเข็มรองรับ เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างไม้นั้นสามารถออกแบบบ้านให้รองรับได้โดยใช้ฐานรากแบบแผ่ ไม่ใช้ฐานรากแบบเสาเข็ม และโครงสร้างไม่มีการใช้วัสดุชนิดเหล็กปริมาณรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

นอกจากนี้การจัดการก่อสร้างบ้านไม้จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าการก่อสร้างบ้านคอนกรีตเสริมเหล็กและบ้านโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ทำให้สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างได้มากถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (Tighnavard and Marsono, 2017)

ตารางที่ 3 แสดงค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้าน

ลำดับ	ส่วนของโครงสร้าง	ค่าการปลดปล่อยก๊าซ CO ₂ emissions (kgCO ₂ eq)		
		คอนกรีตเสริมเหล็ก	ไม้	เหล็กรูปพรรณ
1	ฐานรากและตอม่อ	7,620.05	5,430.49	7,483.06
2	คาน เสา พื้นและบันได	90,081.25	78,303.59	82,013.72
3	หลังคา	11,906.28	10,226.54	10,454.59
	รวม	109,607.57	93,960.62	99,951.36

จากตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้านแต่ละชนิดพบว่าโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 93,960.62 kgCO₂eq โดยสามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละส่วนของโครงสร้างบ้านดังนี้ ส่วนฐานรากและตอม่อ โครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 5,430.49 kgCO₂eq ต่ำกว่าชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณอย่างชัดเจนที่ 28.74% และ 27.43% ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างไม้มีน้ำหนักโครงสร้างเบาทำให้การออกแบบฐานรากไม่ต้องใช้เสาเข็มแต่ออกแบบเป็นฐานรากแบบแผ่แทน และในส่วน of โครงสร้างคาน เสา พื้น และบันไดนั้น โครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 78,303.59 kgCO₂eq ต่ำกว่าชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ 13.07% และ 4.52% ตามลำดับ และในส่วน of โครงสร้างหลังคาพบว่าโครงสร้างไม้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเท่ากับ 10,226.54 kgCO₂eq ต่ำกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่ 14.11% และ 2.18% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 6

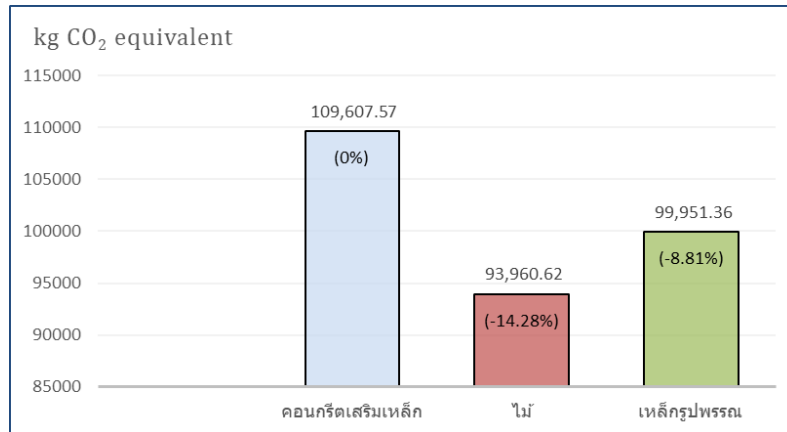


ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO₂eq) ส่วนของโครงสร้างบ้าน

ตารางที่ 4 แสดงค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โครงสร้างบ้านแต่ละชนิด

ลำดับ	ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ โครงสร้าง	ค่าปริมาณ CO ₂ emissions (kgCO ₂ eq)	% การเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีตเสริมเหล็ก
1	คอนกรีตเสริมเหล็ก	109,607.57	0%
2	ไม้	93,960.62	-14.28%
3	เหล็กรูปพรรณ	99,951.36	-8.81%

จากตารางที่ 4 พบว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ปริมาณสูงสุด 109,607.57 kgCO₂eq รองลงมาคือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 99,951.36 kgCO₂eq และโครงสร้างไม้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 93,960.62 kgCO₂eq โครงสร้างเหล็กรูปพรรณกับโครงสร้างไม้จะมีความแตกต่างของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ 8.81% และ 14.28% ตามลำดับ โดยโครงสร้างไม้จะมีค่าน้อยกว่าโครงสร้างเหล็กถึง 6% ซึ่งค่าที่ได้นี้อยู่ในทิศทางเดียวกับผลการวิจัย (Duan et al., 2022) และ (Allan and Phillips., 2021) ซึ่งสอดคล้องกัน และค่าเฉลี่ยของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อพื้นที่ใช้สอย (m²) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเท่ากับ 680.80 kgCO₂eq/m² โครงสร้างไม้เท่ากับ 583.61 kgCO₂eq/m² และโครงสร้างเหล็กรูปพรรณเท่ากับ 620.82 kgCO₂eq/m² ซึ่งจากค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบ้านไม้มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 7 อย่างไรก็ตามยังพบว่ามีการวิจัยบ้านโครงสร้างไม้ชนิด CLT ของประเทศสเปนซึ่งมีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เท่ากับ 140 kgCO₂eq/m² (Lechón et al., 2021) ซึ่งต่ำกว่าโครงสร้างไม้เนื้อแข็ง



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โครงสร้างบ้านแต่ละชนิด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาในส่วนของ Product stage ของส่วนโครงสร้างบ้านเท่านั้น โดยไม่ได้ทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของการตกแต่งบ้านและกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาในส่วนอื่นๆ ของบ้านต่อไป เช่น การเปลี่ยนแปลงชนิดผนังของบ้านที่จะส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) การก่อสร้างด้วยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้และเหล็กรูปพรรณมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยงานวิจัย Tighnavard and Marsono (2017) พบว่าการก่อสร้างด้วยโครงสร้างไม้นั้นสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างและลดต้นทุนก่อสร้างได้ถึง 30% เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก ซึ่งข้อเสียของโครงสร้างไม้คือความสามารถในการรับน้ำหนักเมื่อเวลาผ่านไป จะพบการหดตัว การแตกร้าว การเสื่อมสภาพที่คานและเสาไม้ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักและการทนทานของโครงสร้างไม้จะช่วยให้สามารถใช้งานโครงสร้างไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งด้านการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ระยะเวลาการก่อสร้างและต้นทุนการก่อสร้างได้

จากการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของโครงสร้างบ้านประหยัดพลังงาน แบบบ้านดีดีรักษ์ฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน พบว่าโครงสร้างบ้านไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำที่สุดเพียง 583.61 kgCO₂eq/m² รองลงมาคือโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 620.82 kgCO₂eq/m² และ 680.80 kgCO₂eq/m² ตามลำดับ สามารถพิจารณาได้อีกว่านอกเหนือจากการประหยัดพลังงานที่ได้จากการออกแบบและการใช้งานบ้านประหยัดพลังงานนี้ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลในการลดสภาวะโลกร้อนมากยิ่งขึ้น โครงสร้างไม้จะสามารถช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของการก่อสร้างบ้านพักอาศัยได้ถึง 14.28% เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และ 6% เมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ บ้านโครงสร้างไม้จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบโครงสร้างบ้านเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สาเหตุที่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็กเพราะว่ากระบวนการได้มาของไม้นั้นไม่ต้องผ่านการใช้พลังงานในการผลิตและแปรรูปมากเท่ากับการได้มาของคอนกรีตและเหล็ก โดยคอนกรีตและเหล็กนั้นต้องผ่านการระเบิด การถลุง การหลอม การบดอัด ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิตสูง แต่การผลิตไม้นั้นทำการตัดและแปรรูปให้ได้ขนาดที่ต้องการเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- Acen, C., Bamisile, O., Cai, D., Ukwuoma, C. C., Obiora, S., Huang, Q., Uzun Ozsahin, D., and Adun, H. (2024). The complementary role of carbon dioxide removal: A catalyst for advancing the COP28 pledges towards the 1.5 °C Paris Agreement target. *Science of The Total Environment*, 947, 174302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174302>
- Allan, K., and Phillips, A. R. (2021). Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of low and mid-rise mass timber buildings with equivalent structural steel alternatives. *Sustainability*, 13(6), 3401. <https://doi.org/10.3390/su13063401>
- Ascione, F., Bianco, N., Maria Mauro, G., and Napolitano, D. F. (2019). Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal discomfort. Application to different Italian climatic zones. *Energy*, 174, 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.182>
- Chang, J. H., Huang, K.-T., and Wang, J. C. (2023). Energy performance of school roofing materials in hot and humid climates. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02586. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02586>
- Costa, L. G. L., and Beck, A. T. (2024). A critical review of probabilistic live load models for buildings: Models, surveys, Eurocode statistics and reliability-based calibration. *Structural Safety*, 106, 102411. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2023.102411>
- Duan, Z., Huang, Q., Sun, Q., and Zhang, Q. (2022). Comparative life cycle assessment of a reinforced concrete residential building with equivalent cross laminated timber alternatives in China. *Journal of Building Engineering*, 62, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105357>
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings*. Calculation method.
- Ghafoor, S., Shooshtarian, S., Udawatta, N., Gurmu, A., Karunasena, G., and Maqsood, T. (2024). Cost factors affecting the utilisation of secondary materials in the construction sector: A systematic literature review. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 23, 200230. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200230>
- Hammond, G., and Jones, C. (2008). *Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. University of Bath.
- Hu, K., Yang, Y., Mu, S., and Qu, G. (2012). Study on high-rise structure with oblique columns by ETABS, SAP2000, MIDAS/GEN and SATWE. *Procedia Engineering*, 31, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1054>

- Irfan Sadaq, S., Nawazish Mehdi, S., and Mohinoddin, M. (2023). Experimental analysis on solar photovoltaic (SPV) panel for diverse slope angles at different wind speeds. *Materials Today: Proceedings*. (in Press). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.265>
- Jayalath, A., Navaratnam, S., Ngo, T., Mendis, P., Hewson, N., and Aye, L. (2020). Life cycle performance of cross laminated timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*, 223, 110091. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091>
- Lechón, Y., la Rúa, C., de, and Lechón, J. I. (2021). Environmental footprint and life cycle costing of a family house built on CLT structure. Analysis of hotspots and improvement measures. *Journal of Building Engineering*, 39, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102239>
- Ministry of Energy. (2022). *Good house design guide (DEDE) energy conservation*. [Online]. Retrieved from: <https://www.dede.go.th/>
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2023). *Five-year national action plan (2023–2027)*. Bangkok: Department of Climate Change and Environment.
- Sangsawang, T., Sukjit, T., and Surochotiwate, T. (2014). The analysis of carbon footprint in house construction: Case study of a 300 m² residential house. *Khon Kaen University Science Journal*, 42(3), 579–588.
- Syngros, G., Balaras, C. A., and Koubogiannis, D. G. (2017). Embodied CO₂ emissions in building construction materials of Hellenic dwellings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>
- Thinley, J., and Hengrasmee, S. (2023). Innovating Bhutan’s residential construction with mass timber for economic and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, 78, 107763. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107763>
- Tighnavard, B., A., and Marsono, A. K. B. (n.d.). (2017). Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Building and Environment*, 124, 357-368.
- TGO. (2023). *Emission factor. In Encyclopedic dictionary of polymers*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30160-0_4312
- UNEP. (2024). *Global status report for buildings and construction*. United Nations Environment Programme. [Online]. Retrieved from: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>
- UNSD. (2020). *The sustainable development goals report (Vol. 728, Issue 2)*. United Nations. [Online]. Retrieved from: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>

- Wallengren, E., Guthold, R., Newby, H., Moller, A.-B., Marsh, A. D., Fagan, L., Azzopardi, P., Ba, M. G., and Kågesten, A. E. (2024). Relevance of the sustainable development goals (SDGs) to adolescent health measurement: A systematic mapping of the SDG framework and global adolescent health indicators. *Journal of Adolescent Health*, 74(6), S47–S55.
<https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2024.01.004>
- Yin, X., Xu, Z., Yang, Y., Luo, Y., and Wang, J. (2019). Human-induced vibration control with TMDs for Guangzhou Asian Games Comprehensive Museum. *The International Journal of Acoustics and Vibration*, 24(4), 736–743. <https://doi.org/10.20855/ijav.2019.24.41458>

Semi-Supervised Left Atrium Segmentation in 3D Cardiac MRI Using Confidence-Guided Pseudo-Labeling

Peaysararn Rapinrangchang*, Tanasai Sucontphunt
Graduate School of Applied Statistics,
National Institute of Development Administration

Received: 27 July 2025

Revised: 21 October 2025

Accepted: 28 October 2025

Abstract

This study proposes a semi-supervised learning framework for left atrium (LA) segmentation from three-dimensional cardiac Magnetic Resonance Imaging (MRI) using pseudo-labeling. The objective is to improve segmentation performance under limited labeled-data conditions. The proposed method integrates a 3D U-Net architecture with an iterative training pipeline and dynamic confidence-based pseudo-label refinement. Using the Medical Segmentation Decathlon dataset, experiments demonstrate that the semi-supervised model achieves a mean Dice Coefficient (DSC) of 0.9066 ± 0.0043 and a mean Average Hausdorff Distance (AHD) of 2.2409 ± 0.3661 , surpassing the fully supervised baseline (DSC: 0.8519 ± 0.0395 ; AHD: 4.7696 ± 1.3128). Qualitative evaluation further confirms reduced false positives and enhanced anatomical precision. The results indicate that the proposed approach effectively leverages unlabeled data to achieve high segmentation accuracy with minimal manual annotation, providing a practical solution for clinical management of atrial fibrillation (AF).

Keywords: Left Atrium Segmentation, Semi-supervised Learning, Deep Learning

*Corresponding Author; E-mail: 6610422018@stu.nida.ac.th

Introduction

AF is a significant global public health concern. While the age-adjusted prevalence of AF has remained relatively stable between 1990 and 2019, the numbers of affected individuals and Disability-Adjusted Life Years (DALYs) have increased significantly. This rise is primarily attributed to population aging and growth (Roth et al., 2020). Recent studies in the United States have reported an AF prevalence as high as 3.89%, exceeding previous estimations, with variations across demographic groups. For instance, men are more prone to AF than women, while non-Hispanic Whites exhibit a higher prevalence compared with other groups (Oltman et al., 2024). In Thailand, community-based screening among adults aged ≥ 65 years showed an AF prevalence of 2.8% (Suwanwela et al., 2021), and among hypertensive patients, the prevalence was 3.46% (Krittayaphong et al., 2016). These findings highlight a heightened burden in high-risk populations such as the elderly and those with cardiovascular comorbidities, underscoring the need for effective screening and diagnostic methods.

A detailed understanding of the LA structure is crucial for AF management. LA imaging using MRI provides highly accurate structural information, serving as a vital tool for optimal treatment planning. Deep learning—particularly convolutional neural networks (CNNs)—has emerged as a powerful technique for medical image segmentation due to its ability to automatically extract hierarchical and spatial features. This enables more accurate, robust, and scalable segmentation compared with traditional methods that rely on handcrafted features or manual rules. In the context of LA segmentation, deep learning models can better capture complex anatomical variations, which is critical for clinical decision-making. Although deep learning techniques for MRI analysis and segmentation can yield promising results, many rely on fully supervised learning, which requires large amounts of accurately labeled data. This requirement poses a significant challenge, as acquiring expert-annotated medical images is costly and time-consuming. In contrast, semi-supervised learning approaches aim to reduce dependency on labeled data by leveraging both labeled and unlabeled datasets. These methods strike a balance between performance and annotation efficiency, and they have recently gained attention as a promising direction in medical imaging. For instance, a recent study demonstrated that semi-supervised learning techniques achieved significantly improved segmentation performance for brain metastases on multicenter MRI data, especially in low-label scenarios (Ottesen et al., 2024). Their findings underscore the robustness and generalizability of semi-supervised approaches across heterogeneous datasets, highlighting their potential in real-world clinical applications where annotated data is limited. Therefore, integrating deep learning with semi-supervised techniques offers a practical solution to enhance the utilization of available data while reducing the reliance on extensive manual annotation by medical experts (Wang et al., 2022).

In practice, deep learning models for MRI-based segmentation typically require a substantial amount of annotated data to achieve robust and generalizable performance. The effectiveness of these models has been shown to improve with increases in both the number of labeled training samples and the spatial resolution of the input data, reflecting the importance of data volume and structural detail in complex anatomical segmentation tasks (Yang et al., 2024). Similarly, a study evaluating U-Net performance in organ segmentation found that the DSC started at 0.424 with just eight labeled cases and increased substantially to 0.858 with 160 cases, reaching 0.867 when trained with 320 cases. This trend underscores the strong dependency of segmentation accuracy on the availability of sufficient annotated data (Bardis et al., 2020). These observations reinforce the notion that high-quality labeled datasets—often comprising tens to hundreds of annotated cases—remain critical factors in the success of supervised deep learning methods for MRI segmentation.

Despite the clear benefits of using large annotated datasets, assembling such datasets remains a formidable challenge. An analysis of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) publications between 2011 and 2019 revealed that the geometric mean of dataset sizes grew at annual rates of approximately 21% for MRI, 24% for Computed Tomography (CT), and 31% for functional MRI (fMRI), reflecting increasing community expectations for larger datasets in medical image analysis (Kiryati and Landau, 2021). In a more tangible exemplar, segmentation of multi-organ CT volumes in the AbdomenAtlas project estimated that a trained annotator might spend 30–60 minutes per CT volume under manual annotation, and completing all 8,448 CT volumes by conventional means would require on the order of 1,600 weeks (~30.8 years) of continuous effort (Qu et al., 2023). Such formidable time and labor demands underline the infeasibility of relying solely on fully annotated datasets, motivating approaches such as semi-supervised learning, active learning, pre-annotation, and annotation-correction guidance to alleviate annotation burden.

This research employs semi-supervised learning to address the limited labeled data challenge in LA segmentation from MRI images. In this study, we intentionally adopt an extreme low-data scenario as the labeled set while leveraging additional unlabeled images via pseudo-labeling. This constraint is chosen to simulate real-world clinical settings where expert-annotated data are scarce. The proposed method will be benchmarked against a fully supervised baseline under identical data conditions to evaluate how much semi-supervised learning can mitigate performance degradation due to the low sample size.

Research Objectives

1. To develop a semi-supervised learning framework for LA segmentation in 3D cardiac MRI using pseudo-labeling.
2. To benchmark the proposed method against a fully supervised baseline under limited labeled-data conditions.

Literature Review

Conventional LA segmentation often employs CNNs in conjunction with supervised learning techniques. For instance, Zhang et al. (2021) presented a CNN model integrated with Bayesian filtering for LA segmentation from MRI, achieving a DSC of 94.1% for 2-chamber, 3-chamber, and 4-chamber views. Similarly, Aryan et al. (2022) utilized U-Net with ground-truth MRI data, reporting a DSC of 0.94. However, traditional CNN-based approaches are limited by their reliance on large amounts of labeled data, which can be a significant obstacle in medical applications where such data are scarce. To address this limitation, Swetha et al. (2023) proposed an improved U-Net architecture incorporating skip connections to enhance LA segmentation accuracy while reducing the dependence on extensive labeled data. Furthermore, Uslu et al. (2021) introduced LA-Net, which employs cross-attention modules (CAMs) and enhanced decoder modules (EDMs) for LA segmentation without requiring post-processing, demonstrating advancements in techniques that are less reliant on labeled data.

The DSC has become a widely adopted metric for evaluating segmentation performance in medical imaging, particularly in tasks involving small and irregular structures like the LA. According to Taha and Hanbury (2015), DSC provides a robust and intuitive measure of spatial overlap between predicted and reference segmentations, making it especially suitable for 3D image analysis. However, DSC, being overlap-based, may not fully capture spatial discrepancies, and it therefore should be considered alongside other evaluation metrics in some cases. Similarly, Müller et al. (2022) proposed practical guidelines for selecting evaluation metrics in medical image segmentation, recommending DSC as a primary metric due to its interpretability, while also encouraging the use of complementary measures—such as the AHD and sensitivity—to gain a more comprehensive understanding of model performance, especially in the presence of class imbalance.

To mitigate the limitations associated with extensive labeled data requirements, semi-supervised learning has gained attention for LA segmentation, leveraging unlabeled data in conjunction with a limited amount of labeled data. For example, Wang et al. (2022) presented a Dual-Consistency technique using only 20% labeled data and 80% unlabeled data, employing model-level perturbations and structure-level spatial contextual perturbations to improve LA

segmentation accuracy. Likewise, Shi et al. (2024) employed a Multi-Level Consistency technique emphasizing consistency across multiple levels, including the use of virtual adversarial training to enhance unlabeled data utilization, achieving a DSC of 91.69%. Additionally, Liu et al. (2022) proposed a semi-supervised framework comprising a segmentation model and a classification model with a contrastive consistency loss to facilitate better discrimination between labeled and unlabeled data, achieving a DSC of 89.81%. More recently, Xu et al. (2024) introduced SAMatch, which utilizes a SAM-guided match-based framework to generate pseudo-labels from unlabeled data, demonstrating excellent results in LA segmentation even with limited labeled data, such as achieving a DSC of 89.36% on the Automated Cardiac Diagnosis Challenge (ACDC) cardiac MRI dataset. These techniques demonstrate the potential of semi-supervised learning to improve LA segmentation performance without necessitating large labeled datasets.

While supervised learning can achieve satisfactory results in LA segmentation, it remains dependent on substantial labeled data, which can be a constraint in medical contexts due to the limited availability of such data. Conversely, semi-supervised learning techniques can leverage unlabeled data alongside a small amount of labeled data to enhance LA segmentation performance without excessive reliance on labeled data. Therefore, this research compares the performance of semi-supervised learning against supervised learning to evaluate which technique achieves superior LA segmentation accuracy in limited labeled-data scenarios.

Research Methodology

This study proposes a semi-supervised learning framework for LA segmentation in three-dimensional cardiac MRI, aiming to overcome the challenge of limited annotated data. The proposed method integrates a 3D U-Net architecture with a confidence-based pseudo-labeling strategy and an iterative training pipeline. The methodology comprises four main components: dataset preparation, model architecture, pseudo-labeling strategy, and training procedure.

1) Dataset Preparation

Experiments were conducted using the Medical Segmentation Decathlon (MSD) Task 02: Heart dataset (Antonelli et al., 2022), which consists of 30 cardiac MRI volumes—20 labeled and 10 unlabeled. Two dataset configurations were prepared for different experimental settings:

- Baseline Set: This configuration uses only the labeled data. Ten labeled volumes were used for training and five for validation. The remaining five labeled volumes were excluded from both training and validation, and no unlabeled data were used. This setup serves as the baseline for fully supervised training.

- Semi-Supervised Set: This configuration includes both labeled and unlabeled data. The same ten labeled volumes were used for training and five for validation. The remaining five labeled volumes were reassigned as unlabeled, combining with the ten original unlabeled volumes to form a pool of fifteen unlabeled samples. To enhance the diversity of unlabeled data, augmentation techniques such as random rotation and zoom were applied, resulting in thirty unlabeled samples used for pseudo-label generation.

The configurations of both sets are summarized in Table 1.

Table 1 Dataset Configurations

Configuration	Training (Labeled)	Unlabeled (Original)	Unlabeled (Augmented)	Validation (Labeled)	Total
Baseline Set	10	0	0	5	15
Semi-Supervised Set	10	15	15	5	45

2) Model Architecture

The segmentation model is based on a 3D U-Net architecture, implemented using the MONAI framework due to its optimized support for 3D medical imaging and integration with PyTorch. The architecture comprises an encoder-decoder structure with skip connections and residual units, facilitating the preservation of spatial and contextual information throughout the network. All models were trained using the Adam optimizer with a learning rate of 0.0005, a batch size of 2, and a weight decay of 0.0001. To ensure a fair comparison, these hyperparameters were held constant across both supervised and semi-supervised training regimes. All experiments were executed on an NVIDIA Tesla P100 Graphics Processing Unit (GPU) with 15 GB of Video Random Access Memory (VRAM).

3) Pseudo-Labeling Strategy

To leverage unlabeled data, a confidence-aware pseudo-labeling mechanism was employed. During each training iteration, the current model was used to generate segmentation predictions for the unlabeled volumes. Voxel-wise confidence scores were obtained from softmax probabilities, and only predictions that exceeded a dynamically adjusted confidence threshold were retained as pseudo-labels. The threshold was initialized at 70% and incrementally increased up to 90%, based on the model's validation performance. As the validation DSC improved, the threshold was raised to filter out low-confidence predictions, thereby ensuring the quality of the pseudo-labels. This dynamic adjustment helped reduce the propagation of noisy or unreliable labels into subsequent training stages.

These threshold values (0.70–0.90) were selected based on empirical observations. In our experiments, when the threshold was set below 0.6, the validation DSC often fluctuated significantly, suggesting the inclusion of noisy predictions. Setting the initial threshold (the starting point) at 0.7 helped stabilize training, while increasing the threshold toward 0.9 as the model improved avoided overly strict filtering that would discard useful information.

The total training loss was defined as a weighted sum of two components: a supervised loss from ground-truth annotations and an unsupervised loss from pseudo-labeled data. Initially, the pseudo-label loss was assigned a low weight (0.01) to minimize the influence of potential noise. This weight was gradually increased—up to a maximum of 0.4—according to model performance. This adaptive weighting strategy mitigated confirmation bias and enhanced training stability.

The selected range of 0.01–0.4 for the pseudo-label loss weight was also based on extensive experiments. Fixed weights ranging from 0.1 to 1.0 were initially tested, and the best DSC values were consistently observed when the weight was between 0.2 and 0.4. We then explored adaptive schemes across several ranges (e.g., 0.1–0.3, 0.1–0.5) and found that a dynamic range of 0.01–0.4 yielded the most stable and high-performing results. Starting from 0.01 allowed the model to cautiously incorporate pseudo-labels, while increasing the weight as performance improved enabled better utilization of unlabeled data.

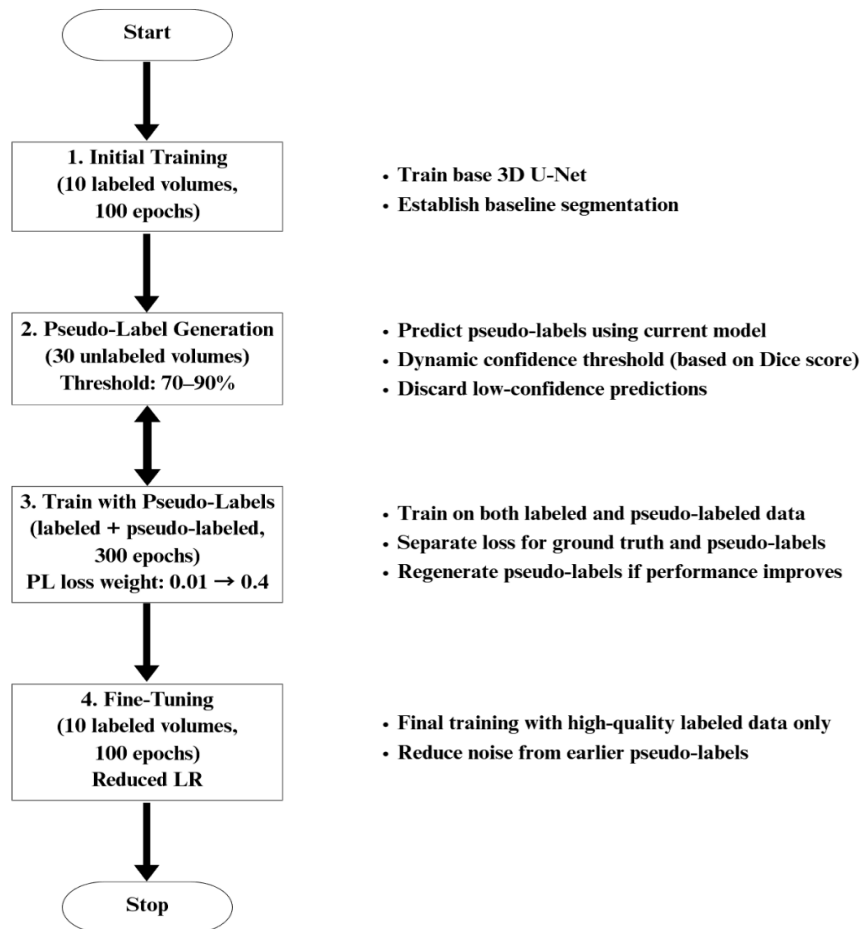
It should be noted that these values were empirically tuned for this specific dataset. When applying the method to other datasets, re-tuning these thresholds and weights is recommended.

4) Training Pipeline

The semi-supervised training follows a four-stage iterative pipeline designed to progressively refine segmentation performance (Figure 1):

1. Initial Training: The base 3D U-Net is trained for 100 epochs using the 10 labeled training volumes to establish baseline segmentation.
2. Pseudo-Label Generation: The trained model generates pseudo-labels for all 30 unlabeled volumes. A dynamic confidence threshold (70%–90%), determined by the validation DSC, filters predictions to retain only high-confidence labels.
3. Training with Pseudo-Labels: The model is trained for 300 epochs on the combined labeled and pseudo-labeled data. Supervised and unsupervised losses are calculated separately, with the pseudo-label loss weight gradually increasing from 0.01 to 0.4 to mitigate the impact of label noise. Pseudo-labels are regenerated iteratively as model performance improves.
4. Fine-Tuning: After multiple refinement cycles, the model is fine-tuned for 100 epochs using only the original labeled data with a reduced learning rate to stabilize performance and mitigate residual noise effects.

Early stopping is employed throughout training, terminating if the validation loss fails to improve for 20 consecutive epochs. Evaluations are conducted every two epochs to prevent overfitting and optimize computational resources.



All stages use early stopping (20-epoch patience), evaluated every 2 epochs.

Figure 1 Training pipeline

5) Evaluation Metrics

To evaluate segmentation performance, two standard metrics are used: the DSC and the AHD. These metrics assess the overlap quality and boundary accuracy between predicted and ground truth segmentations.

1. Dice Similarity Coefficient (DSC) The DSC quantifies the overlap between the predicted segmentation and the ground truth. It is defined as:

$$DSC = \frac{2|P \cap G|}{|P| + |G|} \quad (1)$$

where:

P = set of predicted voxels

G = set of ground truth voxels

A DSC value ranges from 0 to 1, where 1 indicates perfect overlap and 0 indicates no overlap. This metric is particularly useful for evaluating the segmentation accuracy of anatomical structures.

2. Average Hausdorff Distance (AHD) The AHD measures how closely the boundary of the predicted segmentation aligns with that of the ground truth. It is defined as the symmetric average of the distances from all points on one boundary to the closest point on the other boundary:

$$AHD(A, B) = \max \left(\frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \frac{1}{|B|} \sum_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \right)$$

where:

(2)

A = set of boundary points from the predicted segmentation

B = set of boundary points from the ground truth segmentation

This metric computes the average of the minimum distances between boundary points of both segmentations. A lower AHD value indicates better boundary alignment and, consequently, higher segmentation accuracy—particularly important in applications involving fine or complex anatomical structures.

Findings

To evaluate the effectiveness of the proposed semi-supervised segmentation framework, a series of experiments were conducted to compare different training strategies: (1) fully supervised learning; (2) a vanilla semi-supervised variant excluding several key components (no confidence thresholding, no pseudo-label weighting, no iterative pseudo-label generation, and no fine-tuning); (3) semi-supervised learning without fine-tuning; and (4) semi-supervised learning with the full configuration. All experiments were performed under identical settings, including consistent dataset splits, hyperparameters, and computational resources.

1. Quantitative Results

Table 2 presents the quantitative results of segmentation accuracy and training time for all models. The full configuration semi-supervised model achieved the best performance, yielding a mean DSC of 0.9066 ± 0.0043 and the lowest mean AHD of 2.2409 ± 0.3661 . This significantly outperforms the fully supervised baseline, which attained a DSC of 0.8519 ± 0.0395 and an AHD of 4.7696 ± 1.3128 .

Notably, the vanilla semi-supervised variant (DSC 0.8505) showed no improvement in overlap compared to the baseline but did achieve a better boundary alignment (AHD 2.8317). The model without fine-tuning (DSC 0.9045, AHD 2.4762) approached the performance of the full configuration, highlighting the substantial impact of the iterative pseudo-labeling. The markedly lower standard deviations for both DSC and AHD in the full semi-supervised approach indicate more stable and consistent performance across validation samples.

However, this improved accuracy comes at the cost of increased computational time. The full configuration (151 ± 11 min) required substantially more training time than the supervised baseline (53 ± 4 min), reflecting the trade-off between performance and computational resources.

To ensure statistical reliability, each model was trained and evaluated five times independently, and the results are reported as mean $\pm$ standard deviation. This approach mitigates the effects of randomness in training and provides a robust measure of consistency across runs.

Table 2 Comparison of segmentation performance

Model	Dice Score (Validation Set)	Average Hausdorff Distance	Training Time (min)
Fully Supervised	0.8519 ± 0.0395	4.7696 ± 1.3128	53 ± 4
Semi-Supervised (Vanilla)	0.8505 ± 0.0298	2.8317 ± 0.5691	92 ± 17
Semi-Supervised (No Fine-Tuning)	0.9045 ± 0.0071	2.4762 ± 0.4735	126 ± 10
Semi-Supervised (Full Configuration)	0.9066 ± 0.0043	2.2409 ± 0.3661	151 ± 11

Figure 2 illustrates the training dynamics of both models. In the supervised setting, training loss decreased steadily, while the validation DSC plateaued around 0.85. In contrast, the semi-supervised model exhibited fluctuations in training loss during epochs 100–250, coinciding with the integration of pseudo-labeled data. Despite these fluctuations, the validation DSC continued to improve, ultimately surpassing the supervised baseline following the fine-tuning stage. These observations underscore the importance of iterative pseudo-label refinement in enhancing segmentation accuracy, even under increased training complexity.

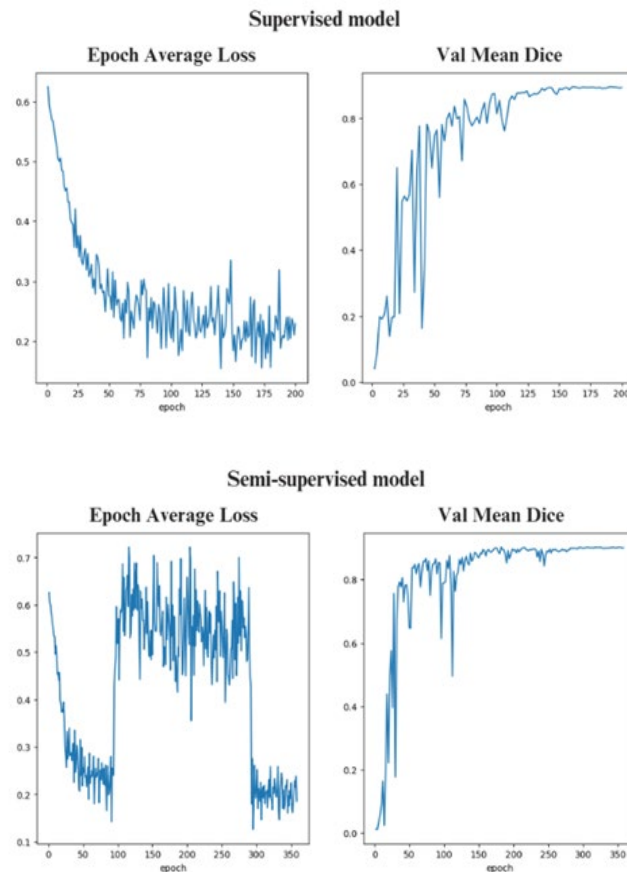


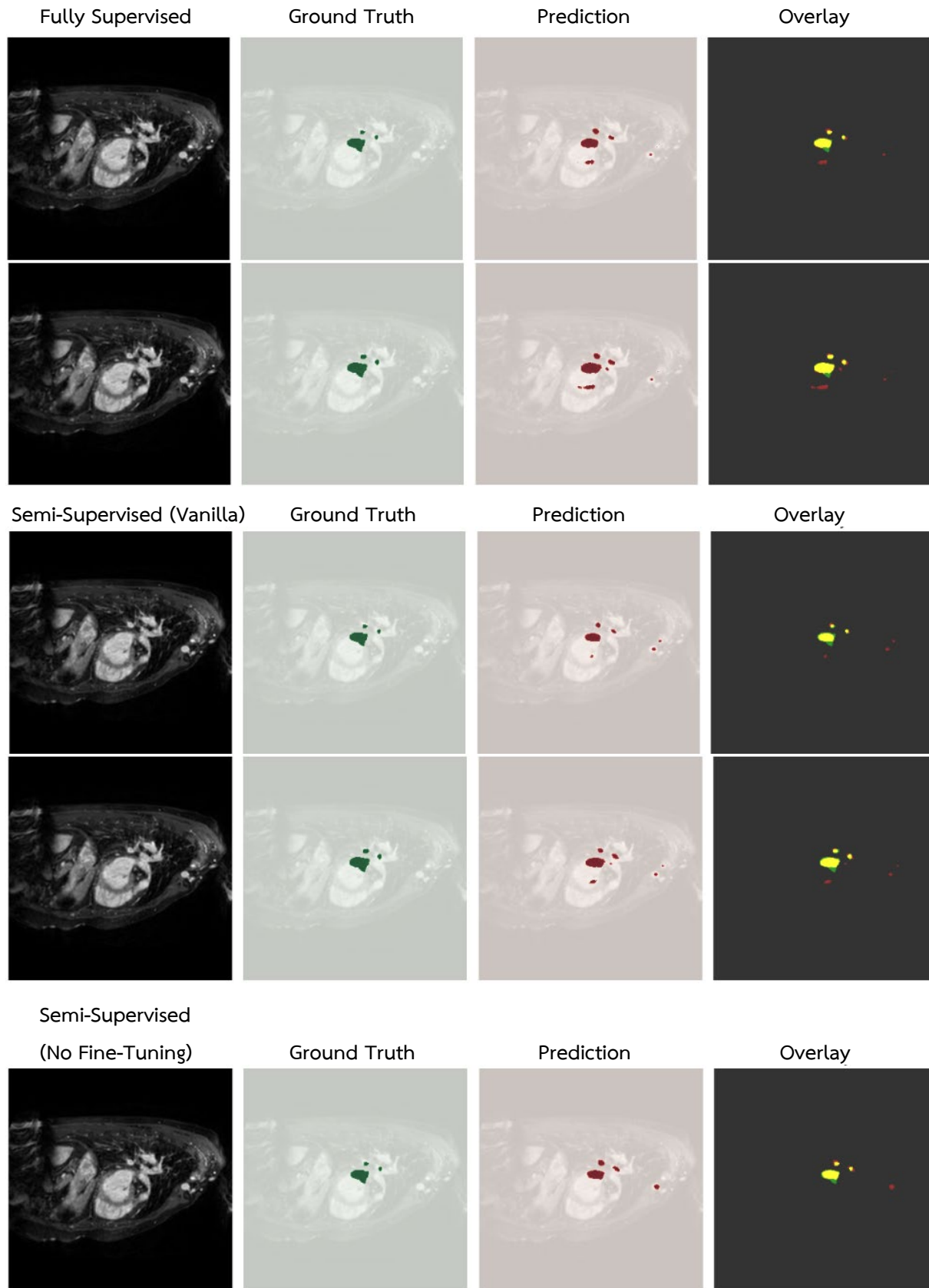
Figure 2 Training loss and validation Dice score for supervised vs. semi-supervised models

2. Qualitative Evaluation

In addition to quantitative metrics, a qualitative assessment was performed on withheld validation volumes to evaluate the anatomical plausibility and visual consistency of the segmentation results. As shown in Figure 3, all semi-supervised variants produced fewer false positives in non-cardiac regions and demonstrated more anatomically accurate delineations of the LA boundary compared to the fully supervised model.

Among the semi-supervised methods, both the configuration without fine-tuning and the full configuration yielded noticeably cleaner segmentations than the vanilla semi-supervised variant, which exhibited residual artifacts and over-segmentation in peripheral regions. The full-configuration model achieved the lowest number of false positives overall, while the no-fine-tuning variant produced slightly higher false positives but still performed substantially better than the vanilla baseline.

These visual observations are consistent with the quantitative results reported in Table 2, reinforcing that iterative pseudo-label refinement and fine-tuning contribute to improved anatomical precision and reduced segmentation noise.



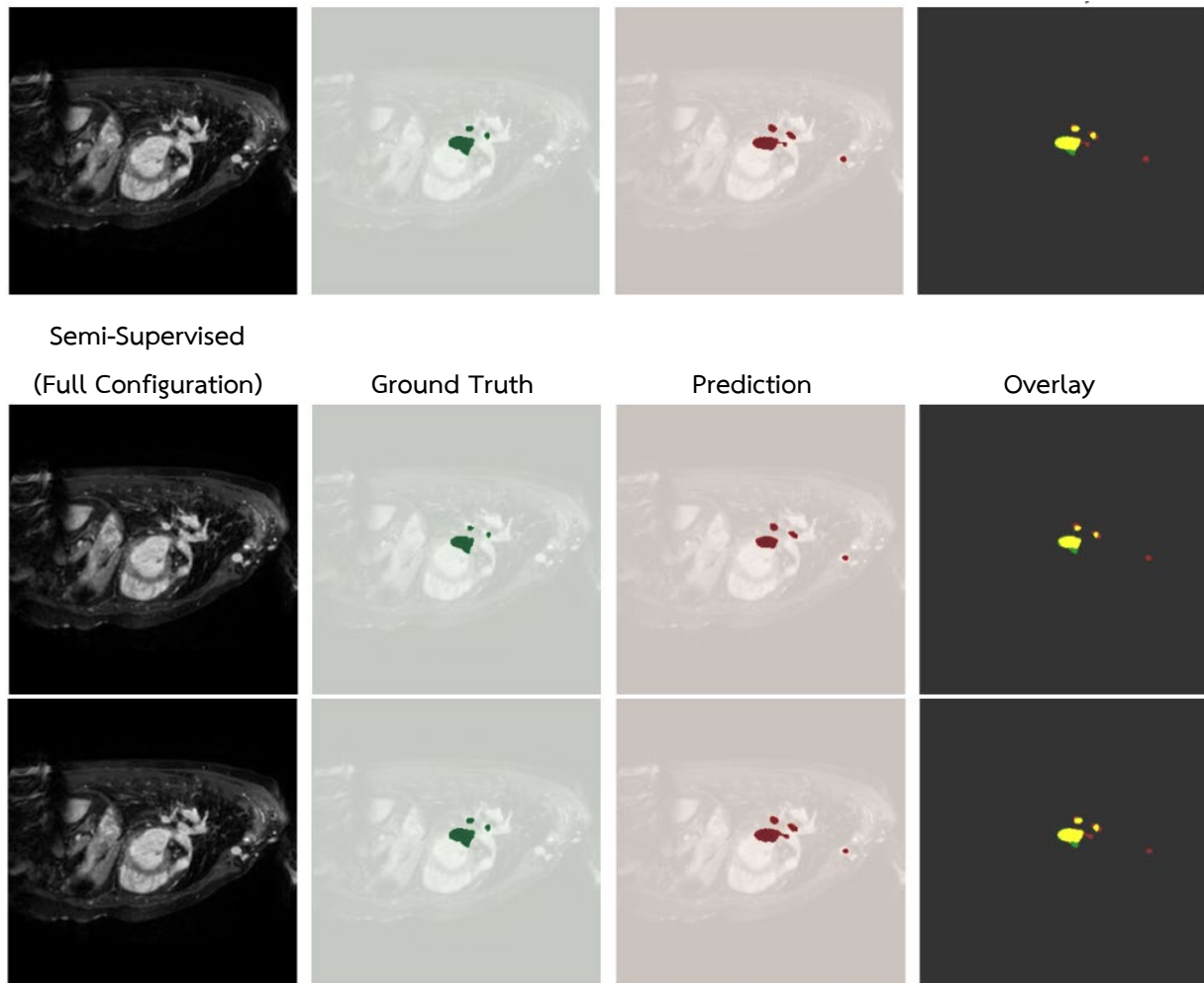


Figure 3 Qualitative comparison of segmentation results

Discussion

The experimental results clearly demonstrate the effectiveness of the proposed semi-supervised framework, particularly in data-scarce environments. The substantial improvement in mean DSC, combined with reduced variance, suggests that the model benefits significantly from leveraging unlabeled data through pseudo-labeling. This finding aligns with existing literature emphasizing the role of unlabeled data in enhancing model generalization.

A key observation is that the semi-supervised model continues to improve even during stages of fluctuating training loss—especially when pseudo-labels are incorporated. This indicates that the model successfully learns meaningful representations from pseudo-labels despite the inherent noise. Qualitative results further confirm more anatomically plausible segmentations, supporting the hypothesis that unlabeled data can guide the model toward better anatomical priors.

To mitigate the impact of noisy pseudo-labels, several strategies were implemented. First, a confidence-aware filtering mechanism was applied to exclude low-probability predictions, with the

confidence threshold dynamically increased from 0.70 to 0.90 as the model improved. Second, the loss weight for pseudo-labeled data was initially set to a very low value (0.01) and gradually increased to 0.4 based on the validation DSC, limiting the early influence of noisy labels. Third, data augmentation was applied to the unlabeled data pool to enhance diversity and reduce overfitting to spurious structures.

Despite these strategies, some noise remains inevitable—primarily due to the limited training data, which constrains the model’s ability to generalize during early training. Increasing the size and diversity of the dataset represents a promising direction for further reducing pseudo-label noise. Incorporating additional labeled examples or employing self-supervised pretraining could further enhance the model’s robustness to label noise and anatomical variability.

Suggestion

1. Suggestions for Research Utilization

This study presents a semi-supervised segmentation framework based on a 3D U-Net architecture for LA segmentation from cardiac MRI. The framework was intentionally designed and evaluated under extremely limited labeled-data conditions to reflect practical constraints in clinical and research environments. By incorporating pseudo-labeling with dynamic confidence filtering, the method effectively leverages unlabeled data to improve segmentation performance while reducing dependence on manual annotation.

Experimental results demonstrate that the semi-supervised model consistently outperforms its fully supervised counterpart in both accuracy and stability, despite being trained on only 10 labeled volumes. This highlights the framework’s capability to operate effectively in data-scarce scenarios, addressing one of the key challenges in medical image analysis.

The iterative refinement of pseudo-labels and the adaptive loss-weighting strategy further enhance model generalization without imposing significant annotation overhead. Nevertheless, the relatively small and homogeneous dataset may limit generalizability to more diverse clinical settings, and the training process remains computationally demanding.

2. Suggestions for Further Research

Future research will explore the scalability and adaptability of the proposed framework through the following directions: 1) Validation on large-scale datasets: Evaluating generalization across multi-center or population-level cardiac MRI datasets, 2) Transfer learning from big data: Pretraining on large datasets and fine-tuning on small labeled subsets for data-scarce domains, 3) Multi-scale pseudo-labeling: Incorporating anatomical context at multiple resolutions to improve pseudo-label robustness, 4) Adaptive uncertainty-aware weighting: Integrating uncertainty estimation

into the loss function to better handle noisy pseudo-labels, and 5) Efficiency-oriented implementation: Developing lightweight models suitable for clinical environments with limited computational resources. These directions aim to enhance scalability, robustness, and clinical applicability in future cardiac image-analysis systems.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

During the preparation of this work, the author(s) utilized ChatGPT as a language support tool to check grammar and explore alternative phrasings that could enhance clarity. Following the use of this tool, the author(s) reviewed and revised the content as necessary and take(s) full responsibility for the final content of the publication.

References

- Antonelli, M., Reinke, A., Bakas, S., Farahani, K., Kopp-Schneider, A., Landman, B. A., et al. (2022). The medical segmentation decathlon. *Nature communications*, 13(1), 4128.
- Aryan, R., Kejriwal, V., Patel, V., Aggarwal, A., Khanna, V., Thomas, S. B., et al. (2022, November). Left Atrium Segmentation Using Deep Learning Model. *The Proceedings of the 19th 2022 IEEE India Council International Conference (INDICON)*, 1-5. IEEE.
- Bardis, M., Houshyar, R., Chantaduly, C., Ushinsky, A., Glavis-Bloom, J., Shaver, M., et al. (2020). Deep learning with limited data: organ segmentation performance by U-Net. *Electronics*, 9(8), 1199.
- Kiryati, N., and Landau, Y. (2021). Dataset growth in medical image analysis research. *Journal of imaging*, 7(8), 155.
- Krittayaphong, R., Rangsin, R., Thinkhamrop, B., Hurst, C., Rattanamongkolgul, S., Sripaiboonkij, N., et al. (2016). Prevalence and associating factors of atrial fibrillation in patients with hypertension: a nation-wide study. *BMC Cardiovascular Disorders*, 16(1), 57.
- Liu, Y., Wang, W., Luo, G., Wang, K., and Li, S. (2022). A contrastive consistency semi-supervised left atrium segmentation model. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 99, 102092.
- Müller, D., Soto-Rey, I., and Kramer, F. (2022). Towards a guideline for evaluation metrics in medical image segmentation. *BMC Research Notes*, 15(1), 210.
- Oltman, C. G., Kim, T. P., Lee, J. W., Lupu, J. D., Zhu, R., and Moussa, I. D. (2024). Prevalence, Management, and Comorbidities of Adults With Atrial Fibrillation in the United States, 2019 to 2023. *JACC: Advances*, 3(11), 101330.

- Ottesen, J. A., Tong, E., Emblem, K. E., Latysheva, A., Zaharchuk, G., Bjørnerud, A., et al. (2025). Semi-Supervised Learning Allows for Improved Segmentation with Reduced Annotations of Brain Metastases Using Multicenter MRI Data. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 61(6), 2469-2479.
- Qu, C., Zhang, T., Qiao, H., Tang, Y., Yuille, A. L., and Zhou, Z. (2023). Abdomenatlas-8k: Annotating 8,000 ct volumes for multi-organ segmentation in three weeks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36, 36620-36636.
- Roth, G. A., Mensah, G. A., Johnson, C. O., Addolorato, G., Ammirati, E., Baddour, L. M., et al. (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: update from the GBD 2019 study. *Journal of the American college of cardiology*, 76(25), 2982-3021.
- Shi, Z., Jiang, M., Li, Y., Wei, B., Wang, Z., Wu, Y., et al. (2024). MLC: Multi-level consistency learning for semi-supervised left atrium segmentation. *Expert Systems with Applications*, 244, 122903.
- Swetha, S., Rafee, A., Manjula, S. H., and Venugopal, K. R. (2023, December). Optimizing Left Atrium Segmentation: A Modified U-NET Architecture with MRI Image Slicing. In *2023 IEEE 2nd International Conference on Data, Decision and Systems (ICDDS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Suwanwela, N. C., Chutinet, A., Autjimanon, H., Ounahachok, T., Decha-Umphai, C., Chockchai, S., et al. (2021). Atrial fibrillation prevalence and risk profile from novel community-based screening in Thailand: A prospective multi-centre study. *IJC Heart and Vasculature*, 32, 100709.
- Taha, A. A., and Hanbury, A. (2015). Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool. *BMC medical imaging*, 15(1), 29.
- Uslu, F., Varela, M., Boniface, G., Mahenthiran, T., Chubb, H., and Bharath, A. A. (2021). LA-Net: A multi-task deep network for the segmentation of the left atrium. *IEEE transactions on medical imaging*, 41(2), 456-464.
- Wang, J., Liu, X., Yin, J., and Ding, P. (2022). DC-net: Dual-Consistency semi-supervised learning for 3D left atrium segmentation from MRI. *Biomedical Signal Processing and Control*, 78, 103870.
- Xu, G., Qian, X., Shao, H. C., Luo, J., Lu, W., and Zhang, Y. (2024). A SAM-guided and Match-based Semi-Supervised Segmentation Framework for Medical Imaging. *arXiv preprint arXiv:2411.16949*.
- Yang, Q., Wang, C., Pan, K., Xia, B., Xie, R., and Shi, J. (2024). An improved 3D-UNet-based brain hippocampus segmentation model based on MR images. *BMC Medical Imaging*, 24(1), 166.
- Zhang, X., Noga, M., Martin, D. G., and Punithakumar, K. (2021). Fully automated left atrium segmentation from anatomical cine long-axis MRI sequences using deep convolutional neural network with unscented Kalman filter. *Medical image analysis*, 68, 101916.

การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ ในการพัฒนาแบบจำลองการประเมิน AUN-QA

วนิดา ปานนพภา^{1,*}, ปราณี มณีรัตน์²

¹นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

Received: 26 July 2025

Revised: 18 August 2025

Accepted: 23 September 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัชซี (FAHP) ในการหาค่าน้ำหนักของเกณฑ์ AUN-QA เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความคลุมเครือในการให้คะแนน พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์กับคะแนนการประเมินคุณภาพเดิมของคณะเพื่อตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (APE) กลุ่มตัวอย่างคือผู้เชี่ยวชาญด้านการประกันคุณภาพ 17 ท่านจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม ซึ่งร่วมกำหนดค่าน้ำหนักโดยวิธีการเปรียบเทียบแบบคู่และวิเคราะห์ค่าความสอดคล้อง ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบ “ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง” และ “แนวทางการจัดการเรียนการสอน” มีค่าน้ำหนักสูงสุด สะท้อนถึงความสำคัญของคุณภาพเชิงวิชาการที่สอดคล้องกับพันธกิจของสถาบัน ค่า APE ของคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะเทคโนโลยีสารสนเทศเท่ากับ 1.563% และ 2.344% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ 3% แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า FAHP สามารถช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบประเมินคุณภาพ และเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์เพื่อพัฒนาคุณภาพการศึกษาอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ การประกันคุณภาพการศึกษาในระดับอุดมศึกษา
แบบจำลองการประเมินการประกันคุณภาพการศึกษาในระดับอุดมศึกษา

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: wanida.pa@spu.ac.th

Application of the Fuzzy Analysis Hierarchy Process to Develop AUN-QA

Wanida- Pannoppa^{1,*}, Paralee- Maneerat²

¹Master's Degree Student, Department of Information Technology,
Faculty of Information Technology, Sripatum University

²Department of Information Technology, Faculty of Information Technology,
Sripatum University

Received: 26 July 2025

Revised: 18 August 2025

Accepted: 23 September 2025

Abstract

This study aimed to apply the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) to determine the weights of the AUN-QA criteria, thereby enhancing accuracy and reducing ambiguity in internal quality assessment scoring. The resulting FAHP-based weights were compared with the original faculty assessment scores to calculate the Absolute Percentage Error (APE). The study involved 17 quality assurance experts from Sripatum University, who conducted pairwise comparisons and consistency ratio analyses to derive the weights. The findings indicated that “Expected Learning Outcomes” and “Teaching and Learning Approach” received the highest weights, underscoring their crucial role in academic quality management and alignment with institutional missions. The APE values for the Faculty of Engineering and the Faculty of Information Technology were 1.563% and 2.344%, respectively, both below the 3% threshold, which confirms the model’s accuracy and robustness. Overall, the results demonstrate that the FAHP approach strengthens the credibility of internal quality assessment systems and provides a strategic decision-support tool for guiding curriculum development, faculty capacity building, and continuous quality improvement in higher education.

Keyword: Fuzzy Analysis Hierarchy Process, AUN-QA, AUN-QA Assessment Models

*Corresponding Author; E-mail: wanida.pa@spu.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประกันคุณภาพการศึกษาในระดับอุดมศึกษาเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยสร้างความน่าเชื่อถือและยกระดับศักยภาพการแข่งขันของสถาบันการศึกษาในระดับชาติและนานาชาติ โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศอาเซียนที่มีความหลากหลายด้านระบบการศึกษา การจัดตั้งเครือข่ายมหาวิทยาลัยอาเซียน (ASEAN University Network: AUN) และการพัฒนาเกณฑ์การประเมิน AUN-QA จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างมาตรฐานกลางที่สามารถใช้เทียบเคียงคุณภาพระหว่างสถาบันได้ (ASEAN University Network, 2020) เกณฑ์ AUN-QA ฉบับปรับปรุง (Version 4.0) ครอบคลุมทั้งปัจจัยนำเข้า กระบวนการดำเนินงาน และผลลัพธ์ทางการศึกษา โดยแบ่งเป็น 8 องค์ประกอบหลัก ซึ่งสะท้อนคุณภาพการศึกษาเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพอย่างรอบด้าน

อย่างไรก็ตาม ในการนำเกณฑ์ AUN-QA ไปใช้จริงในระดับคณะและหลักสูตรของมหาวิทยาลัยศรีปทุมพบว่าข้อจำกัดสำคัญ คือการให้คะแนนที่ขึ้นกับการตีความและประสบการณ์ส่วนบุคคลของผู้ประเมินโดยเฉพาะประเด็นคุณภาพการสอน การบริหารจัดการ และการสนับสนุนผู้เรียน ซึ่งมักอ้างอิงจากเอกสารหรือความคิดเห็นเชิงคุณภาพมากกว่าข้อมูลเชิงปริมาณ ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของผลการประเมินระหว่างผู้ประเมิน ความไม่แน่นอนและความคลุมเครือส่งผลให้การใช้ผลประเมินในการวางแผนกลยุทธ์ และการกำหนดทิศทางการพัฒนาอาจขาดความแม่นยำและไม่ตอบโจทย์เป้าหมายเชิงคุณภาพของสถาบัน (Yu and Qiu, 2022) ในการประเมินปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์เชิงคุณภาพ พบว่าความคิดเห็นของผู้ประเมินมีลักษณะการให้ค่าน้ำหนักไม่ชัดเจน และมีความไม่แน่นอนซึ่งต้องอาศัยการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) มีหลายวิธี เช่น วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) ได้รับความนิยมเนื่องจากโครงสร้างลำดับชั้นที่ชัดเจน แต่มีข้อจำกัดเมื่อข้อมูลมีความไม่แน่นอน กระบวนการเครือข่ายเชิงวิเคราะห์ (Analytic Network Process: ANP) มีการพัฒนาเพื่อรองรับความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์แต่ซับซ้อนในการคำนวณ เทคนิคการเลือกโดยเปรียบเทียบกับคำตอบในอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) และวิธีหาคำตอบประนีประนอมเชิงพหุเกณฑ์ (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje: VIKOR) เหมาะกับข้อมูลเชิงปริมาณโดยใช้แนวคิดจุดอุดมคติหรือคำตอบประนีประนอม วิธีดังกล่าวข้างต้นเป็นการกำหนดค่าน้ำหนักและจัดอันดับทางเลือก FAHP จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลเชิงคุณภาพ เพราะใช้ทฤษฎีฟัซซีช่วยลดความคลุมเครือและสะท้อนความเห็นผู้เชี่ยวชาญได้แม่นยำยิ่งขึ้น (Buckley, 1985)

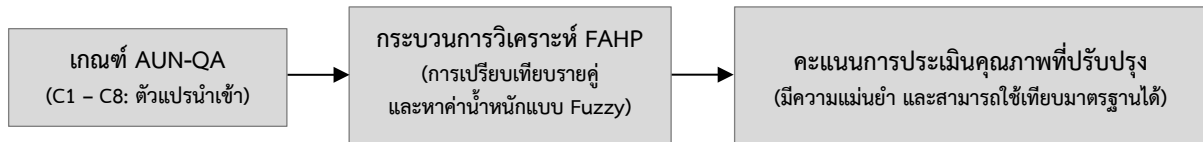
ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองการประเมินคุณภาพโดยใช้ FAHP จึงเป็นแนวทางที่ตอบโจทย์ความท้าทายของระบบประกันคุณภาพอุดมศึกษา ทำให้ผลการประเมินมีความเป็นระบบ และสามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงกลยุทธ์ในการยกระดับคุณภาพการเรียนการสอนและการบริหารจัดการได้อย่างต่อเนื่อง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ ในการกำหนดค่าน้ำหนักคะแนนตามเกณฑ์ AUN-QA
2. เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จาก FAHP กับคะแนนการประเมินคุณภาพเดิมของคณะ และประเมินค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์

กรอบแนวคิดในการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ ผู้วิจัยกำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัยตามเกณฑ์การประกันคุณภาพการศึกษา (AUN-QA) ซึ่งใช้เป็นตัวแปรนำเข้าในการวิจัย โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์หิวิธี FAHP เพื่อหาค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประเมินคุณภาพเชิงเปรียบเทียบกับผลการประเมินเดิม ดังภาพที่ 1

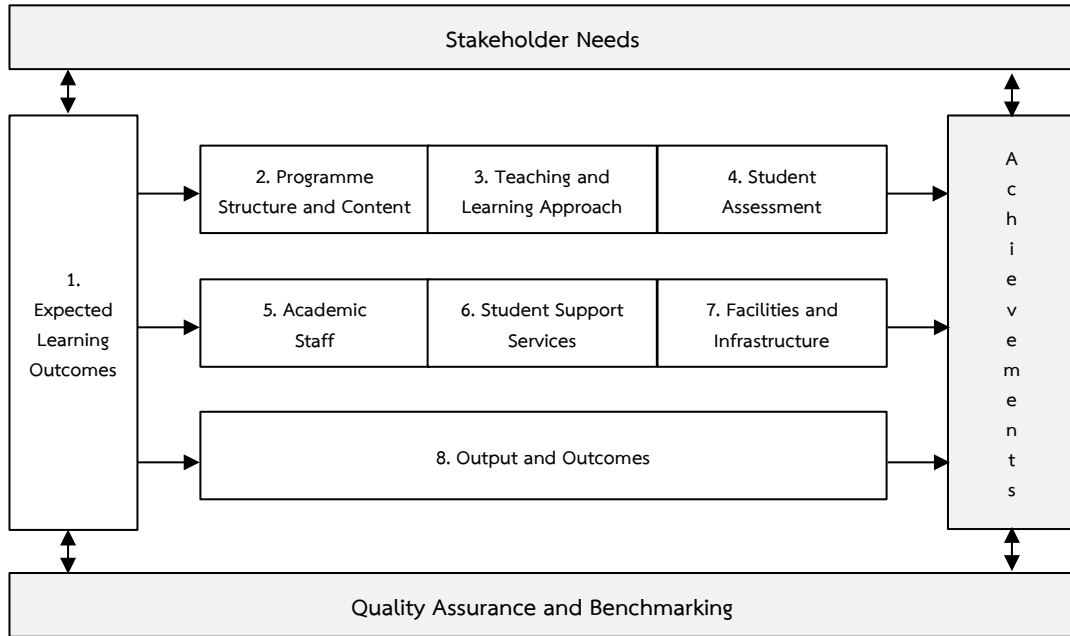


ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

เอกสาร ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประกันคุณภาพการศึกษาระดับอุดมศึกษา (AUN-QA)

จากคู่มือการประกันคุณภาพการศึกษาภายในระดับหลักสูตร ตามเกณฑ์ SPU: AUN-QA (Version 4) (Sripatum University, 2023) เป็นการประกันคุณภาพระดับหลักสูตรหรือระดับโปรแกรมตามเกณฑ์ AUN-QA พิจารณาคุณภาพใน 3 มิติ คือ ปัจจัยนำเข้า กระบวนการ และผลผลิต/ผลลัพธ์ โดยรูปแบบการประกันคุณภาพเริ่มจากการระบุผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (Expected Learning Outcomes) ที่จะให้เกิดกับตัวผู้เรียน การแปลงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังไปสู่การเขียนหลักสูตรหรือโปรแกรมการศึกษาและวิธีที่จะทำให้ บรรลุผลสัมฤทธิ์ ผ่านการจัดการเรียนการสอน และการวัดและประเมินผลผลลัพธ์การเรียนรู้ นั้น ๆ การประเมินคุณภาพระดับหลักสูตรหรือระดับโปรแกรมการศึกษาตามเกณฑ์ AUN-QA ใช้ระบบการประเมินในลักษณะ Rating Scale 7 ระดับ (คะแนนเต็ม 7 คะแนน) ประกอบด้วยเกณฑ์หลัก 8 ข้อ และ เกณฑ์ย่อย 53 ข้อ สำหรับเกณฑ์หลัก 8 ข้อ ได้แก่ 1) ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (Expected Learning Outcomes) 2) โครงสร้างโปรแกรมและเนื้อหา (Programme Structure and Content) 3) แนวทางการจัดเรียนการสอน (Teaching and Learning Approach) 4) การประเมินผู้เรียน (Student Assessment) 5) คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (Academic Staff) 6) การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (Student Support Services) 7) สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (Facilities and Infrastructure) 8) ผลผลิตและผลลัพธ์ (Output and Outcomes) จากเกณฑ์การประเมิน AUN-QA (Version 4.0) ครอบคลุมทั้งปัจจัยนำเข้า กระบวนการ และผลลัพธ์ทางการศึกษา ผ่าน 8 องค์ประกอบหลัก (C1–C8) โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เป็นฐานในการพัฒนาแบบจำลองลำดับชั้น (Hierarchy Model) ของงานวิจัย โดยแต่ละองค์ประกอบ (C1–C8) ทำหน้าที่เป็นเกณฑ์หลักในการเปรียบเทียบแบบคู่ (Pairwise Comparison) เพื่อหาค่าน้ำหนักเชิงสัมพัทธ์ด้วยกระบวนการ FAHP การใช้โครงสร้าง AUN-QA ทำให้แบบจำลองมีความครอบคลุมและสอดคล้องกับมาตรฐานการประเมินคุณภาพที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และทำให้อ่านน้ำหนักที่ได้สะท้อนความสำคัญเชิงนโยบายและเชิงการจัดการได้อย่างแม่นยำ ผลลัพธ์ที่ได้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนและการปรับปรุงคุณภาพการศึกษาของคณะและหลักสูตรได้อย่างตรงจุด ดังภาพที่ 2

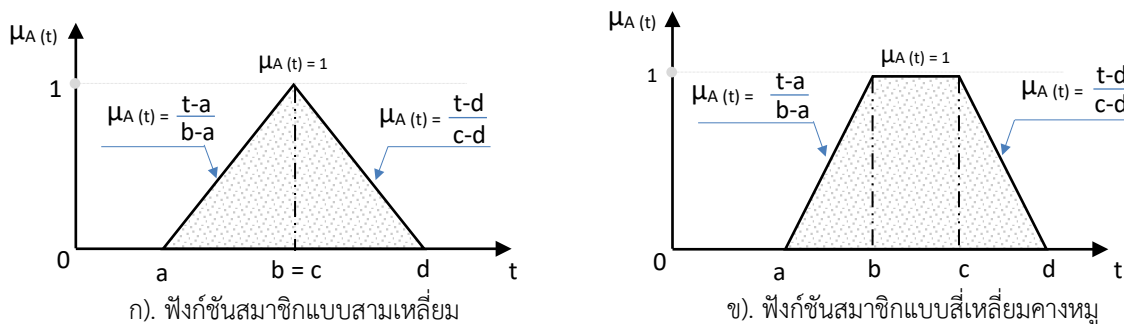


ภาพที่ 2 โครงสร้างการประกันคุณภาพการศึกษาตามเกณฑ์ SPU: AUN-QA (Version 4)

ที่มา: (Sripatum University, 2023)

ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set Theory)

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) ถูกคิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึงความไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งในทฤษฎีเซตปกติจะสามารถแยกได้ว่าตัวแปรใดเป็นหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตนั้น ๆ แต่มีหลายปัญหาที่ไม่สามารถจำแนกหรือกำหนดได้อย่างชัดเจนว่าเป็นจริงหรือเท็จ ปัญหาเหล่านี้มักจะมีลักษณะที่มีความยุ่งยากหรือมีโครงสร้างที่ไม่ชัดเจน ทำให้ยากในการตัดสินใจที่จะแก้ปัญหาเหล่านั้น ๆ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ (Pawan and Lertpaitoonpan, 2018) ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำทฤษฎีฟัซซีเซต มาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาค่าน้ำหนักของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากการตัดสินใจของมนุษย์ ในรูปแบบเงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ ฐานกฎ (Rule Base) ร่วมกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ในรูปแบบที่นิยม 2 รูปแบบ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ฟังก์ชันสมาชิกในระบบฟัซซีเซต

ที่มา: ดัดแปลงจาก Zadeh (1965)

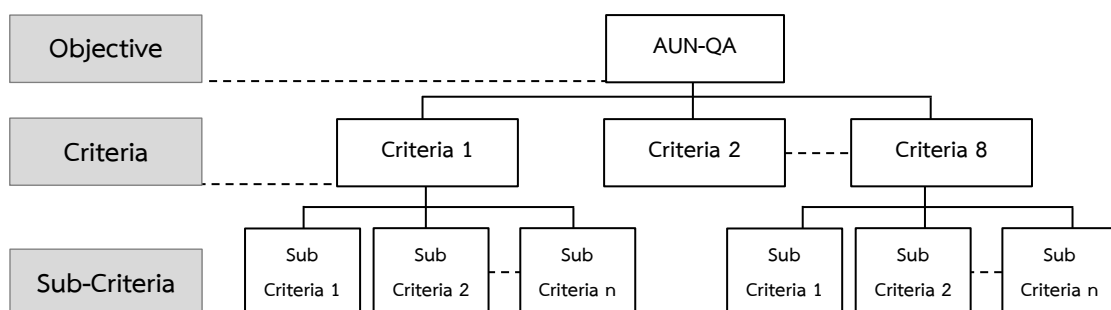
ภาพที่ 3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในระบบฟัซซีเซตที่นิยมใช้มี 2 รูปแบบ คือ (ก) ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Number) ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ a, b, d โดยที่ a คือค่าต่ำสุดที่เริ่มมีความเป็นสมาชิก $b = c$ คือค่าที่มีความเป็นสมาชิกสูงสุด ($\mu = 1$) และ d คือค่าที่สิ้นสุดความเป็นสมาชิก รูปแบบนี้เหมาะสำหรับงานวิจัยที่ต้องการความเรียบง่ายและคำนวณได้รวดเร็ว และ (ข) ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Fuzzy Number) ซึ่งเพิ่มช่วงค่าที่ความเป็นสมาชิกคงที่ ($=1$) ระหว่าง b ถึง c ทำให้เหมาะกับกรณีที่ข้อมูลมีช่วงความเชื่อมั่นที่ชัดเจน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลแลตความซับซ้อนในการคำนวณ คำนวณในกระบวนการ FAHP สามารถเขียนในรูปแบบได้ดังสมการที่ (1)

$$\mu(A) = \begin{cases} \left(\frac{t-a}{b-a}\right) & ; a < t < b \\ 1 & ; b \leq t \leq c \\ \left(\frac{t-d}{c-d}\right) & ; c < t < d \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

สมการ (1) แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) โดยที่ a คือ ค่าต่ำสุดที่เริ่มมีความเป็นสมาชิก, b คือค่าที่มีความเป็นสมาชิกสูงสุด ($=1$), c คือค่าที่สิ้นสุดช่วงความเป็นสมาชิกสูงสุด, และ t คือค่าตัวแปรที่พิจารณา ค่า $\mu_A(t)$ จะเพิ่มแบบเชิงเส้นจาก 0 ถึง 1 เมื่อ t อยู่ระหว่าง $a-b$ คงที่ $=1$ ในช่วง $b-c$ และลดลงเป็น 0 เมื่อ $t > c$ จนถึง d

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytic Hierarchy Process)

ทฤษฎีฟัซซีถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับข้อมูลที่มีความคลุมเครือ โดยการจัดการด้วยตรรกะโดยแสดงออกในรูปแบบของตัวเลขเป็นการแปลงภาษาเป็นตัวเลข ที่แสดงในรูปแบบสามเหลี่ยมเพราะง่ายต่อความเข้าใจ และนำไปใช้ในการคำนวณได้ โดยใช้สามเหลี่ยมตัวเลขฟัซซีกับการเปรียบเทียบกับคู่ของ AHP ด้วยการให้ลำดับความสำคัญในวิธีการเปรียบเทียบเป็นคู่จากผู้เชี่ยวชาญ ชุดข้อมูลแบบฟัซซีแทนการให้คะแนนแบบใช้ตัวเลขประเมินเพียงตัวเลขเดียว (Pawan and Lertpaitoonpan, 2018) ถึงแม้กระบวนการระดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) จะสามารถจัดการกับปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ดีเพียงใด แต่ความคลุมเครือในการตัดสินใจของมนุษย์ก็ยังมีอยู่ จึงได้มีการนำทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎี AHP เพื่อทำให้สามารถตัดสินใจได้ใกล้เคียงกับความคิดที่คลุมเครือของมนุษย์ได้ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างแผนภูมิของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

การบวกกันของ Triangular Fuzzy Number คือ

$$(a_1, b_1, c_1) \oplus (a_2, b_2, c_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (2)$$

การลบกันของ Triangular Fuzzy Number คือ

$$(a_1, b_1, c_1) \ominus (a_2, b_2, c_2) = (a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2) \quad (3)$$

การหาอินเวอร์สของ Triangular Fuzzy Number คือ

$$(a_1, b_1, c_1)^{-1} = (1/c_1, 1/b_1, 1/a_1) \quad (4)$$

สมการ (2) เป็นการบวกค่าต่ำสุด (a) ค่ากลาง (b) และค่าสูงสุด (c) ของจำนวนฟัซซีทั้งสองตามลำดับ เพื่อรวมค่าความไม่แน่นอน สมการ (3) เป็นการลบค่า a, b, c ของจำนวนแรกด้วยจำนวนที่สอง เพื่อหาความแตกต่างหรือลดค่าความสำคัญ สมการ (4) เป็นการหาส่วนกลับของจำนวนฟัซซี โดยกลับค่า c, b, a เป็น (1/c, 1/b, 1/a) เพื่อใช้ในการปรับค่าการเปรียบเทียบให้เหมาะสมใน Pairwise Matrix

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่าเกณฑ์ AUN-QA จะถูกออกแบบมาเพื่อประกันคุณภาพการศึกษาในระดับอุดมศึกษาอย่างเป็นระบบ แต่การนำไปใช้จริงในระดับหลักสูตรยังพบข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะความไม่สอดคล้องของการตีความเกณฑ์ที่ขึ้นอยู่กับมุมมองส่วนบุคคลของผู้ประเมิน (Yu and Qiu, 2022) ความไม่แน่นอนนี้เกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น รายงานผลสัมฤทธิ์ผู้เรียน เอกสารแผนการสอน หรือคำบอกเล่าของผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ซึ่งยากต่อการตรวจสอบและเปรียบเทียบได้อย่างเป็นกลาง (Lee, 2010) งานวิจัยของ Johnson (2017) ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการประเมิน AUN-QA แม้จะช่วยยกระดับคุณภาพการศึกษา แต่ยังขึ้นกับการตีความของผู้ประเมิน ขณะที่ Dolly and Mukhaiyar (2020) เสนอว่าการพัฒนาหลักสูตรให้สอดคล้องกับ AUN-QA ต้องอาศัยทั้งการพัฒนาเชิงระบบและการยกระดับความเข้าใจของผู้ประเมิน

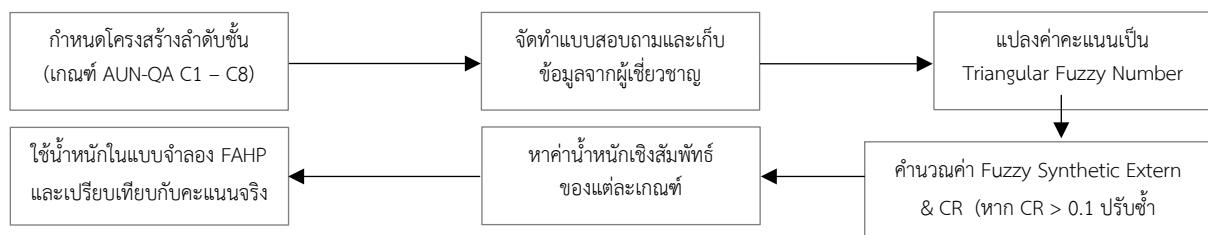
ในบริบทของไทย Anuwong et al. (2022) พบว่าผู้ประเมินภายในส่วนใหญ่ยังต้องการการฝึกอบรมเพิ่มเติมในด้านการประเมินตาม ELO และการคำนวณภาระงานอาจารย์ ซึ่งอาจส่งผลให้ผลการประเมินมีความคลาดเคลื่อน หากขาดการใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นระบบ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว หลายงานวิจัยเสนอการใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDM) เช่น AHP และ FAHP ในการลดความคลุมเครือจากข้อมูลเชิงคุณภาพและเพิ่มความแม่นยำ (Afolayan et al., 2020; Ha et al., 2015) Yin (2013) แสดงศักยภาพของ AHP ในการวิเคราะห์คุณภาพการสอนเชิงทดลอง ขณะที่ Shukri et al. (2021) พัฒนาแบบประเมินคุณภาพการสอนโดยใช้ FAHP เพื่อสะท้อนความคิดเห็นนักศึกษาอย่างเป็นระบบ ทำให้คะแนนที่ได้มีความน่าเชื่อถือและโปร่งใสมากขึ้น Nazari et al. (2016) และ Ha et al. (2015) ยังยืนยันว่า FAHP ช่วยจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อมูลไม่แน่นอน

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้าได้เสนอการใช้ AHP และ FAHP ในการสนับสนุนการตัดสินใจ แต่หลายงานยังเน้นเพียงการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยขาดการตรวจสอบความสอดคล้องกับผลการประเมินจริง และยังมีจำนวนน้อยที่นำ FAHP มาประยุกต์กับเกณฑ์ AUN-QA ในระดับคณะในบริบทของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยพัฒนาแบบจำลอง FAHP ที่สามารถหาค่าน้ำหนักของเกณฑ์ AUN-QA และตรวจสอบ

ความแม่นยำของแบบจำลองด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (APE) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มสากลที่เน้นการใช้วิธีเชิงปริมาณเพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือของการประเมินคุณภาพการศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ออกแบบให้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) ประกอบกับเกณฑ์การประเมิน AUN-QA (C1–C8) เพื่อหาค่าน้ำหนักเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละเกณฑ์และทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การกำหนดโครงสร้างลำดับชั้น (Hierarchy Model) การเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ การคำนวณค่าน้ำหนักเชิงฟัซซี ไปจนถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยด้วยกระบวนการ FAHP

การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเกณฑ์การให้คะแนนในการประเมินคุณภาพตามกรอบ AUN-QA ดำเนินการโดยการสัมภาษณ์ ตามแบบสอบถามผู้เชี่ยวชาญ หน่วยงานต่างๆ ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 17 ท่าน โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มที่มีความรู้ตรงการประเมินคุณภาพตามกรอบ AUN-QA จำนวน 8 ท่าน และกลุ่มที่มีความรู้ไม่ตรงตามการประเมินคุณภาพตามกรอบ AUN-QA แต่มีประสบการณ์ในด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง จำนวน 9 ท่าน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณสมบัติของผู้เชี่ยวชาญ

ลำดับ	หน่วยงาน	ตำแหน่งงาน	กลุ่มความรู้	
			มีความรู้ AUN-QA (X1)	ไม่มีความรู้ AUN-QA (X2)
1	ผู้บริหารมหาวิทยาลัย	ผู้ช่วยอธิการบดี	มีความรู้ตรง	
2	ผู้บริหารมหาวิทยาลัย	ผู้ช่วยอธิการบดีด้านวิชาการ	มีความรู้ตรง	
3	ที่ผู้บริหารคณะ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์		มีความรู้ไม่ตรง
4	ผู้บริหารคณะ	คณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ		มีความรู้ไม่ตรง
5	ผู้บริหารคณะ	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์		มีความรู้ไม่ตรง
6	ผู้บริหารคณะ	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์	มีความรู้ตรง	
7	ผู้บริหารคณะ	ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิชาการ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ	มีความรู้ตรง	
8	ผู้บริหารคณะ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า		มีความรู้ไม่ตรง
9	ผู้บริหารคณะ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมเครื่องกล		มีความรู้ไม่ตรง

ตารางที่ 1 (ต่อ)

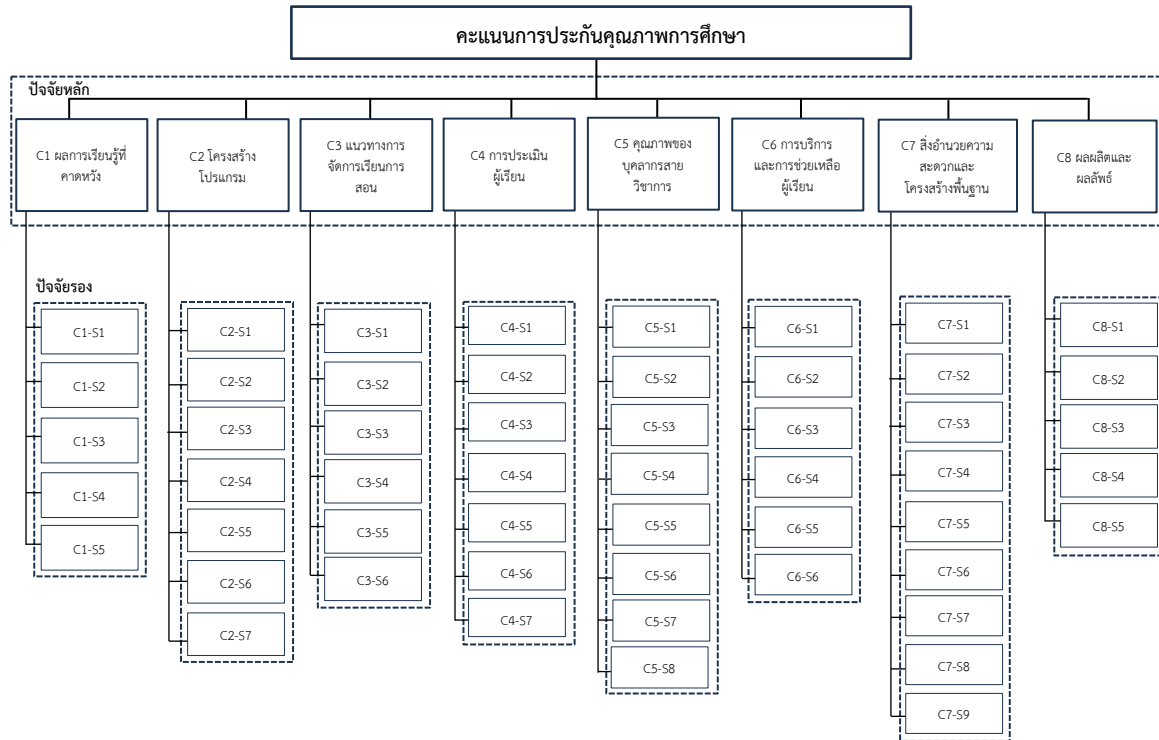
ลำดับ	หน่วยงาน	ตำแหน่งงาน	กลุ่มความรู้	
			มีความรู้ AUN-QA (X1)	ไม่มีความรู้ AUN-QA (X2)
10	ผู้บริหารคณะ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมระบบราง	มีความรู้ตรง	
11	ผู้บริหารคณะ	ผู้จัดการสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์	มีความรู้ตรง	
12	ผู้บริหารหน่วยงาน	ผู้อำนวยการกลุ่มงานโครงสร้างฯ		มีความรู้ไม่ตรง
13	ผู้บริหารหน่วยงาน	ผู้อำนวยการสำนักงานอาคารฯ		มีความรู้ไม่ตรง
14	ผู้บริหารหน่วยงาน	ผู้อำนวยการสำนักงานทะเบียน	มีความรู้ตรง	
15	ผู้บริหารหน่วยงาน	หัวหน้างานงานประกันคุณภาพการศึกษา	มีความรู้ตรง	
16	ผู้บริหารหน่วยงาน	ผู้อำนวยการศูนย์สหกิจศึกษาฯ		มีความรู้ไม่ตรง
17	ผู้บริหารหน่วยงาน	ผู้อำนวยการกิจการนักศึกษา		มีความรู้ไม่ตรง
รวมผู้เชี่ยวชาญ			8 ท่าน	9 ท่าน

การเก็บข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 8 ท่าน ที่มีความรู้ตรงกับประเด็นด้านการประกันคุณภาพการศึกษา ตามกรอบ AUN-QA เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องของปัจจัย และข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยหรือไม่ โดยวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา (Index of Item-Objective Congruence: IOC) และตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) พร้อมทั้งวัดความเที่ยงของแบบสอบถามโดยรวม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากจำนวนผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ตรงยังไม่เพียงพอเมื่อพิจารณาในมิติของปัจจัยย่อยที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์การประเมินในแต่ละด้าน จึงได้ขยายการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ไม่ตรงโดยตรงกับ AUN-QA จำนวน 9 ท่าน ซึ่งมีพื้นฐานด้านวิชาการ การบริหารจัดการ การออกแบบหลักสูตร และการเรียนการสอนระดับอุดมศึกษา จากนั้นได้นำข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของระดับความคิดเห็นโดยใช้การทดสอบค่าที (t-test) เพื่อตรวจสอบว่ามีความแตกต่างเชิงนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ตรง (X1) กับกลุ่มที่มีความรู้ไม่ตรง (X2) อันจะช่วยยืนยันความน่าเชื่อถือของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ และข้อคำถามของเครื่องมือวิจัยก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

การพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองการประเมินคุณภาพการศึกษาที่ประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ ความคลุมเครือ ให้สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนในการให้คะแนนตามเกณฑ์ AUN-QA มีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างแผนภูมิลำดับขั้น (Hierarchy) จากปัจจัยหลัก จำนวน 8 ปัจจัย ได้แก่ ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง (C1) โครงสร้างโปรแกรม (C2) แนวทางการจัดการเรียนการสอน (C3) การประเมินผู้เรียน (C4) คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (C5) การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (C6) สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (C7) และ ผลผลิตและผลลัพธ์ (C8) ซึ่งแต่ละปัจจัยหลักประกอบด้วยปัจจัยรองต่าง ๆ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แผนภูมิลำดับชั้นการกำหนดค่าน้ำหนักคะแนนตามเกณฑ์ AUN-QA

2. กำหนดความหมายและการเปรียบเทียบรายคู่ เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญเข้าใจระดับความสำคัญและความหมายในการตัดสินใจ จากคำอธิบายต่างๆ ที่เป็นตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic Variables) และตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangle Fuzzy Number: TFN) ซึ่งเป็นค่าตัวเลขส่วนกลับจากตัวเลข (ทั่วไป) เช่น ตัวแปรเชิงภาษาที่มีความสำคัญระหว่างเท่ากันถึงมากกว่าเล็กน้อยค่าตัวเลขคือ 2 แปลงเป็นตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม คือ (1, 2, 3) และถ้าต้องการทำให้เป็นค่าส่วนกลับแบบฟัซซี คือ (1/3, 1/2, 1/1) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหมายของการเปรียบเทียบเป็นรายคู่ระดับความสำคัญตัวแปรเชิงภาษา

ตัวแปรเชิงภาษา (linguistic Variables)	ตัวเลข AHP	ตัวเลข Fuzzy แบบสามเหลี่ยม	
		TFN	Reciprocal TFN
มีความสำคัญเท่ากัน	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
มีความสำคัญระหว่างเท่ากันถึงมากกว่าเล็กน้อย	2	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
มีความสำคัญมากกว่าเล็กน้อย	3	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
มีความสำคัญระหว่างมากกว่าเล็กน้อยถึงมากกว่าปานกลาง	4	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
มีความสำคัญมากกว่าปานกลาง	5	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
มีความสำคัญระหว่างมากกว่าปานกลางถึงมากกว่ามาก	6	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
มีความสำคัญมากกว่ามาก	7	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
มีความสำคัญระหว่างมากกว่ามากถึงมากที่สุด	8	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)
มีความสำคัญมากที่สุด	9	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/8)

ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการศึกษาตารางที่ 2 เป็นอย่างดีแล้ว จึงทำการตอบแบบสัมภาษณ์ โดยเปรียบเทียบรายคู่ (พิจารณาจากปัจจัยแรกเทียบกับปัจจัยหลัง) เช่น คู่ที่ 1 ผลการเรียนรู้ที่คาดหวังเป็นปัจจัยแรก กับ โครงสร้างโปรแกรมเป็นปัจจัยหลัง โดยแต่ละปัจจัยมีระดับความสำคัญ ตั้งแต่ 1 ถึง 9 ที่บ่งบอกถึงปัจจัยแรกสำคัญมากกว่าปัจจัยหลัง และปัจจัยหลังสำคัญมากกว่าปัจจัยแรก ดังแสดงตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบรายคู่ระหว่างผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง กับ โครงสร้างโปรแกรม

คู่ที่	ปัจจัยแรก	ปัจจัยแรก สำคัญมากกว่า									ปัจจัยหลัง สำคัญมากกว่า								ปัจจัยหลัง
		ปัจจัยหลัง									ปัจจัยแรก								
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	C1 ผลการเรียนรู้ ที่คาดหวัง																		C2 โครงสร้าง โปรแกรม
								x											

เมื่อกำหนดระดับความสำคัญของปัจจัย ตารางที่ 2 ลงในตารางที่ 3 เรียบร้อยแล้ว จากนั้นผู้เชี่ยวชาญทำการพิจารณาและตัดสินใจระดับความสำคัญ เช่น ตัวอย่างการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยหลัก คู่ที่ 1 C1 ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง (ปัจจัยแรก) กับ C2 โครงสร้างโปรแกรม (ปัจจัยหลัง) มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งหมายความว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์ปัจจัยแรก สำคัญกว่าเกณฑ์หลัง มีความสำคัญระหว่างมากกว่าเล็กน้อย ถึงมากกว่าปานกลาง คือ (3, 4, 5) ระหว่างการพิจารณาและตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบ ค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) ดังสมการที่ 5

$$CR = CI/RI \quad (5)$$

โดยที่ ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ 6

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

สำหรับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index : RI) พิจารณาจากตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (RI) และค่าอัตราความสอดคล้อง (CR)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49
CR	5%			9%		10%				

ในกรณีที่ค่า CR น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.10 ถือว่ายอมรับได้ แต่ถ้าค่า CR มากกว่า 0.10 ยอมรับไม่ได้ ต้องทำการทบทวนค่าน้ำหนักเปรียบเทียบในเกณฑ์นั้นใหม่ โดยผู้สัมภาษณ์จะแจ้งผู้เชี่ยวชาญทราบระหว่างให้ข้อมูล

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและทำความเข้าใจหลักการของเทคนิคเดลฟาย (Delphi Technique) เพื่อประยุกต์ใช้ในการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งให้ความหมายของเทคนิคเดลฟายว่าเป็นกระบวนการรวบรวมความคิดเห็นและข้อเสนอแนะจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ โดยมุ่งเน้นการได้มาซึ่งฉันทามติที่มีความน่าเชื่อถือ ภายใต้เงื่อนไขที่เปิดโอกาสให้ผู้เชี่ยวชาญสามารถแสดงความคิดเห็นอย่างอิสระและเป็นส่วนตัว เพื่อลดอิทธิพลจากบุคคลอื่นหรือการประชุมแบบเผชิญหน้าโดยตรง (Surapanpairoj and Pawan, 2022; Saipia and Pawan, 2022) สำหรับการดำเนินงานในครั้งนี้

ผู้วิจัยได้คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญจำนวน 17 ท่าน และจัดกลุ่มตามความเชี่ยวชาญให้ครอบคลุมองค์ประกอบหลักทั้ง 8 ของเกณฑ์ AUN-QA (องค์ประกอบละ 2-3 ท่าน) จากนั้นดำเนินการเก็บข้อมูลแบบ Modified Delphi โดยให้ผู้เชี่ยวชาญทำการให้คะแนนการเปรียบเทียบเชิงคู่ผ่านแบบฟอร์มที่จัดเตรียมไว้ เมื่อได้รับคะแนนแล้ว ผู้วิจัยคำนวณค่าความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ทันทีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของการให้คะแนน หากค่า CR เกินเกณฑ์ที่กำหนด (มากกว่า 0.1) จะให้ผู้เชี่ยวชาญทบทวนและปรับคะแนนใหม่ภายในการสัมภาษณ์ครั้งเดียว โดยดำเนินการซ้ำจนกว่าค่า CR จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (≤ 0.1) กระบวนการลักษณะนี้ช่วยให้ได้ค่าคะแนนที่มีความสอดคล้องสูงภายในเวลาที่สั้นลง ลดจำนวนรอบการเข้าพบผู้เชี่ยวชาญ และยังคงหลักการสำคัญของ Delphi ที่ให้โอกาสผู้เชี่ยวชาญทบทวนคำตอบจนเกิดฉันทามติได้อย่างเป็นระบบ

3. การคำนวณหาค่าน้ำหนักของปัจจัย เพื่อกำหนดระดับความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัย โดยการวิเคราะห์ของผู้เชี่ยวชาญ ทำการเปรียบเทียบทีละคู่ ซึ่งมีปัจจัยหลัก (Criteria) ทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่ ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง (C1) โครงสร้างโปรแกรม (C2) แนวทางการจัดการเรียนการสอน (C3) การประเมินผู้เรียน (C4) คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (C5) การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (C6) สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (C7) และผลผลิตและผลลัพธ์ (C8) ดังแสดงตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางเมทริกซ์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก Criteria C1 – C8

ปัจจัยหลัก (Criteria)									
เกณฑ์	ค่าน้ำหนักความสำคัญ	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	14.17%	(1.00,1.00,1.00)	(8.00,1.00,0.14)	(9.00,1.00,0.13)	(6.00,3.00,0.11)	(8.00,1.00,0.11)	(9.00,4.00,0.11)	(6.00,2.00,0.13)	(7.00,1.00,0.11)
C2	10.58%	(7.00,1.00,0.13)	(1.00,1.00,1.00)	(6.00,1.00,0.11)	(5.00,1.00,0.14)	(6.00,0.25,0.14)	(6.00,1.00,0.17)	(5.00,1.00,0.14)	(4.00,1.00,0.11)
C3	14.52%	(8.00,1.00,0.11)	(9.00,1.00,0.17)	(1.00,1.00,1.00)	(9.00,1.00,0.20)	(7.00,1.00,0.13)	(8.00,1.00,0.25)	(7.00,1.00,0.14)	(8.00,1.00,0.25)
C4	12.46%	(9.00,0.33,0.17)	(7.00,1.00,0.20)	(5.00,1.00,0.11)	(1.00,1.00,1.00)	(7.00,1.00,0.13)	(7.00,2.00,0.14)	(8.00,2.00,0.20)	(4.00,1.00,0.17)
C5	14.47%	(9.00,1.00,0.13)	(7.00,4.00,0.17)	(8.00,1.00,0.14)	(8.00,1.00,0.14)	(1.00,1.00,1.00)	(8.00,5.00,0.33)	(7.00,2.00,0.50)	(7.00,1.00,0.20)
C6	10.48%	(9.00,0.25,0.11)	(6.00,1.00,0.17)	(4.00,1.00,0.13)	(7.00,0.50,0.14)	(3.00,0.20,0.13)	(1.00,1.00,1.00)	(5.00,2.00,0.14)	(5.00,1.00,0.14)
C7	10.96%	(8.00,0.50,0.17)	(7.00,1.00,0.20)	(7.00,1.00,0.14)	(5.00,0.50,0.13)	(2.00,0.50,0.14)	(7.00,0.50,0.20)	(1.00,1.00,1.00)	(5.00,1.00,0.14)
C8	12.36%	(9.00,1.00,0.14)	(9.00,1.00,0.25)	(4.00,1.00,0.13)	(6.00,1.00,0.25)	(5.00,1.00,0.14)	(7.00,1.00,0.20)	(7.00,1.00,0.20)	(1.00,1.00,1.00)

และปัจจัยรอง (Sub-Criteria) 53 ปัจจัย เช่น ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง (C1) ประกอบด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังที่เหมาะสมเป็นไปตามระบบหรือมาตรฐานการเรียนรู้ที่เป็นที่ยอมรับ (C1-S1) หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ของรายวิชาทั้งหมดอย่างเหมาะสม โดยสอดคล้องกับผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร (C1-S2) หลักสูตรแสดงผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง ประกอบด้วยผลลัพธ์ การเรียนรู้ทั่วไป และผลการเรียนรู้เฉพาะทาง (C1-S3) หลักสูตรแสดงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยเฉพาะผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายนอกที่ถูกรวบรวมและสะท้อนให้เห็นในผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (C1-S4) หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังที่บรรลุได้ของผู้เรียนเมื่อสำเร็จการศึกษา (C1-S5) โดยแสดงตารางเมทริกซ์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางเมทริกซ์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง Sub-Criteria 1

ปัจจัยรอง (Sub-Criteria) ภายใต้ปัจจัยหลัก C1 (ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง)						
เกณฑ์	ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ	C1-S1	C1-S2	C1-S3	C1-S4	C1-S5
C1-S1	10.79%	(1.00,1.00,1.00)	(0.50,0.33,0.25)	(0.50,0.33,0.25)	(0.33,0.33,0.25)	(0.50,0.33,0.25)
C1-S2	17.69%	(4.00,3.00,2.00)	(1.00,1.00,1.00)	(2.00,0.50,0.25)	(3.00,1.00,0.33)	(0.33,0.33,0.25)
C1-S3	24.15%	(4.00,3.00,2.00)	(4.00,2.00,0.50)	(1.00,1.00,1.00)	(3.00,1.00,0.33)	(2.00,1.00,0.33)
C1-S4	23.09%	(4.00,3.00,2.00)	(3.00,1.00,0.33)	(3.00,1.00,0.33)	(1.00,1.00,1.00)	(2.00,1.00,0.50)
C1-S5	24.28%	(4.00,3.00,2.00)	(4.00,3.00,3.00)	(3.00,1.00,0.50)	(2.00,2.00,0.50)	(1.00,1.00,1.00)

ในขั้นตอนดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 สามารถแสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองภายใต้ปัจจัยหลัก C1 ซึ่งหมายถึง ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง โดยมีค่าความสำคัญรวมของปัจจัยหลักอยู่ที่ 0.14 ซึ่งสะท้อนถึงการให้ความสำคัญกับการบรรลุผลการเรียนรู้ในระดับหลักสูตรภายใต้เกณฑ์ AUN-QA สำหรับปัจจัยรองที่มีค่าน้ำหนักสูงสุดสองปัจจัย ได้แก่ C1-S5 (0.24) และ C1-S3 (0.24) ปัจจัย C1-S5 เน้นที่การแสดง ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังที่บรรลุได้ของผู้เรียนเมื่อสำเร็จการศึกษา ซึ่งมีค่าน้ำหนักสูงสุดแสดงถึงความสำคัญที่สูงที่สุดในกลุ่ม ขณะที่ C1-S3 เกี่ยวข้องกับการแสดงผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง ซึ่งประกอบด้วยผลลัพธ์การเรียนรู้ทั่วไปและผลการเรียนรู้เฉพาะทาง ที่มีค่าน้ำหนักสูงเช่นกัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญในการพัฒนาและการจัดการผลการเรียนรู้ที่มีความหลากหลาย รองลงมา คือ C1-S4 (0.23) ซึ่งกล่าวถึงการแสดงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยเฉพาะผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายนอกที่ถูกรวบรวมและสะท้อนให้เห็นในผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง ความสำคัญของปัจจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงการเชื่อมโยงการออกแบบหลักสูตรกับการตอบสนองความต้องการของตลาดและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายนอก ปัจจัย C1-S2 (0.18) รองลงมา เน้นที่การแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ของรายวิชาทั้งหมดอย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการประเมินผลที่เกี่ยวกับการบูรณาการรายวิชาในหลักสูตร สุดท้าย ปัจจัย C1-S1 (0.11) ซึ่งมีค่าน้ำหนักต่ำสุดในกลุ่มนี้ กล่าวถึงการแสดงผลการเรียนรู้ที่คาดหวังที่เหมาะสมตามระบบหรือมาตรฐานการเรียนรู้ที่เป็นที่ยอมรับ โดยมีความสำคัญน้อยที่สุดในกลุ่มนี้ แต่มันยังคงเป็นส่วนสำคัญในการรักษามาตรฐานและความสอดคล้องของหลักสูตร จากการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยรองที่เกี่ยวข้องกับ C1 จะเห็นได้ว่าแต่ละปัจจัยมีบทบาทสำคัญในการประเมินผลการเรียนรู้ที่คาดหวังในระดับหลักสูตร ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาหลักสูตรที่ตอบสนองต่อความต้องการทั้งภายในและภายนอกองค์กร

ตารางที่ 7 ตารางเมทริกซ์หาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง Sub-Criteria 1

ค่าน้ำหนักความสำคัญจากแบบจำลอง				
ปัจจัยหลัก (Criteria)		ปัจจัยรอง (Sub-Criteria)		ค่าน้ำหนัก ปัจจัยรอง
C1 (0.14)	ผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง	C1-S1	หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังที่เหมาะสมเป็นไปตามระบบหรือมาตรฐานการเรียนรู้ที่เป็นที่ยอมรับ	0.11
		C1-S2	หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ของรายวิชาทั้งหมดอย่างเหมาะสม โดยสอดคล้องกับผลลัพธ์การเรียนรู้ของหลักสูตร	0.18
		C1-S3	หลักสูตรแสดงผลการเรียนรู้ที่คาดหวัง ประกอบด้วยผลลัพธ์ การเรียนรู้ทั่วไป และผลการเรียนรู้เฉพาะทาง	0.24
		C1-S4	หลักสูตรแสดงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย โดยเฉพาะผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายนอกที่ถูกรวบรวมและสะท้อนให้เห็นในผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง	0.23
		C1-S5	หลักสูตรแสดงผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวังที่บรรลุได้ของผู้เรียนเมื่อสำเร็จการศึกษา	0.24

ตรวจสอบค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) ดังแสดงตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR)

ตรวจสอบค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR)								
Consistency	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
$\lambda_{\max}$	0.098	0.029	0.118	0.051	0.139	0.123	0.135	0.104
CR	0.087	0.022	0.095	0.039	0.099	0.099	0.093	0.093

ผลการคำนวณค่า CR ของเมทริกซ์เปรียบเทียบแบบคู่ในทุกเกณฑ์หลัก (C1–C8) พบว่าค่า CR อยู่ในช่วง 0.022–0.093 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 0.10 ที่แสดงว่าความสอดคล้องของการให้คะแนนอยู่ในระดับยอมรับได้ ทำให้ค่าความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้คำนวณน้ำหนักในขั้นตอน FAHP ต่อไปอย่างมีความน่าเชื่อถือ

ผลการวิจัย

การประเมินผลความสอดคล้องของค่าคะแนนตามเกณฑ์ AUN-QA ระหว่างแบบจำลอง FAHP กับค่าคะแนนจริงในปี 2566 ได้มีการนำค่าน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FAHP มาคูณกับคะแนนผลลัพธ์ของแต่ละเกณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบกับคะแนนจริงในปีเดียวกัน โดยทำการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error: APE) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความใกล้เคียงของแบบจำลอง FAHP กับค่าคะแนนจริง

APE เป็นตัวชี้วัดมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง เนื่องจากให้ผลลัพธ์ในรูปเปอร์เซ็นต์ที่เข้าใจง่ายและเปรียบเทียบข้ามเกณฑ์ได้สะดวก งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระบุว่าค่า APE ต่ำกว่า

5% ถือว่ามีความแม่นยำในระดับยอมรับได้ ดังนั้น ค่า APE ที่ต่ำกว่า 3% ในการศึกษาครั้งนี้จึงยืนยันความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง FAHP และแสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้ประเมินคุณภาพภายใน ดังตารางที่ 9 และ 10

ตารางที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อน (APE) : คณะวิศวกรรมศาสตร์

เกณฑ์หลัก	คะแนน Model ปี 66 ค่า น้ำหนัก	คะแนน Model FAHP เทียบ ปี 66				คะแนน ปี 66	ความคลาดเคลื่อน (APE)
		SOE ₆₆	SOE _{66-AHP}	SOE _{Fuzzy}	SOE _{FAHP}		
1 ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (5 ตัวบ่งชี้)	0.14	4.00	0.57	4.00	0.57	4.00	0.000
2 โครงสร้างโปรแกรม/หลักสูตรและเนื้อหา (7 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.42	3.75	0.40	4.00	6.250
3 แนวทางการจัดการเรียนการสอน (6 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	0.58	4.25	0.62	4.00	6.250
4 การประเมินผู้เรียน (7 ตัวบ่งชี้)	0.13	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.000
5 คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (8 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	0.58	4.00	0.58	4.00	0.000
6 การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (6 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.42	4.00	0.42	4.00	0.000
7 สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (9 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.44	4.00	0.44	4.00	0.000
8 ผลผลิตและผลลัพธ์ (5 ตัวบ่งชี้)	0.12	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.000
คะแนนรวม	1.00	4.00	4.01	4.00	4.02	4.00	1.563

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบคะแนนการประเมินคุณภาพการศึกษาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าคะแนนตามโมเดล FAHP กับคะแนนเดิมที่เคยใช้ในปีการศึกษา 2566 ทั้งนี้เพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (APE) ของแต่ละเกณฑ์หลักภายใต้ระบบ AUN-QA

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า APE โดยรวมเท่ากับ 1.563 ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง FAHP เมื่อเทียบกับคะแนนดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม มีบางเกณฑ์ที่มีค่า APE สูง ได้แก่ เกณฑ์ที่ 2 (โครงสร้างหลักสูตรและเนื้อหา) และเกณฑ์ที่ 3 (แนวทางการจัดการเรียนการสอน) ซึ่งมีค่า APE เท่ากับ 6.250 โดยทั้งสองเกณฑ์นี้มีระดับการแปรผันของคะแนนที่น่าสังเกตและควรได้รับการวิเคราะห์เพิ่มเติมว่าเกิดจากความไม่สอดคล้องของการประเมินในระดับปฏิบัติหรือจากโมเดลการให้น้ำหนัก

ตารางที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อน (APE) : คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

เกณฑ์หลัก	คะแนน Model ปี 66 คำนวณ	คะแนน Model FAHP เทียบ ปี 66				คะแนน ปี 66	ความคลาดเคลื่อน (APE)
		IT ₆₆	IT ₆₆ -AHP	IT _{Fuzzy}	IT _{FAHP}		
1 ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (5 ตัวบ่งชี้)	0.14	4.00	0.57	3.75	0.53	4.00	6.250
2 โครงสร้างโปรแกรม/หลักสูตรและเนื้อหา (7 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.42	4.00	0.42	4.00	0.000
3 แนวทางการจัดการเรียนการสอน (6 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	0.58	4.25	0.62	4.00	6.250
4 การประเมินผู้เรียน (7 ตัวบ่งชี้)	0.13	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.000
5 คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (8 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	0.58	4.00	0.58	4.00	0.000
6 การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (6 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.42	4.00	0.42	4.00	0.000
7 สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (9 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	0.44	4.25	0.47	4.00	6.250
8 ผลผลิตและผลลัพธ์ (5 ตัวบ่งชี้)	0.12	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.000
คะแนนรวม	1.00	4.00	4.01	4.03	4.04	4.00	2.344

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบคะแนนการประเมินคุณภาพการศึกษาของคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าคะแนนตามโมเดล FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) กับคะแนนเดิมที่ใช้ในการประเมินในปีการศึกษา 2566 เพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (APE) ของแต่ละเกณฑ์หลักภายใต้กรอบการประกันคุณภาพ AUN-QA

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า APE รวมของทั้ง 8 เกณฑ์อยู่ที่ 2.344 ซึ่งยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง FAHP ในการประเมินเทียบกับคะแนนดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม มีบางเกณฑ์ที่มีค่า APE สูง ได้แก่ เกณฑ์ที่ 1 (ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง) เกณฑ์ที่ 3 (แนวทางการจัดการเรียนการสอน) และเกณฑ์ที่ 7 (สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน) ซึ่งล้วนมีค่า APE เท่ากับ 6.250 โดยเป็นกลุ่มที่มีความแปรผันของคะแนนระหว่างโมเดล FAHP กับผลการประเมินดั้งเดิมในระดับที่ควรตรวจสอบเพิ่มเติม

เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง FAHP ที่ถูกพัฒนาขึ้นและตรวจสอบระดับความใกล้เคียงของผลการประเมินคุณภาพการศึกษาในแต่ละหมวดหมู่ จึงได้นำคะแนนที่ได้จากแบบจำลองของคณะวิศวกรรมศาสตร์ เปรียบเทียบกับคะแนนของคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อน (APE) คณะวิศวกรรมศาสตร์ เปรียบกับ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

เกณฑ์หลัก		คะแนน Model ปี 66 ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ	คะแนนเดิม ปี 66		ค่าความคลาดเคลื่อน (APE)	
			SOE	IT	SOE	IT
1	ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (5 ตัวบ่งชี้)	0.14	4.00	4.00	0.000	6.250
2	โครงสร้างโปรแกรม/หลักสูตรและเนื้อหา (7 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	4.00	6.250	0.000
3	แนวทางการจัดการเรียนการสอน (6 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	4.00	6.250	6.250
4	การประเมินผู้เรียน (7 ตัวบ่งชี้)	0.13	4.00	4.00	0.000	0.000
5	คุณภาพของบุคลากรสายวิชาการ (8 ตัวบ่งชี้)	0.15	4.00	4.00	0.000	0.000
6	การบริการและการช่วยเหลือผู้เรียน (6 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	4.00	0.000	0.000
7	สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน (9 ตัวบ่งชี้)	0.11	4.00	4.00	0.000	6.250
8	ผลผลิตและผลลัพธ์ (5 ตัวบ่งชี้)	0.12	4.00	4.00	0.000	0.000
คะแนนรวม		1.00	4.00	4.00	1.563	2.344

ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error: APE) ระหว่าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ (SOE) และคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องของคะแนน การประเมินในแต่ละองค์ประกอบคุณภาพภายใต้ระบบประกันคุณภาพ AUN-QA โดยเปรียบเทียบคะแนนของแต่ละ คณะในปีการศึกษา 2566 กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง FAHP

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนรวมของคณะวิศวกรรมศาสตร์อยู่ที่ 1.563 ขณะที่ของ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศอยู่ที่ 2.344 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง FAHP มีความแม่นยำในการสะท้อนคะแนนที่ เคยใช้จริงได้ในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณารายเกณฑ์จะพบว่ามีบางหัวข้อที่มีค่า APE สูง ได้แก่ เกณฑ์ที่ 1 (ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง), เกณฑ์ที่ 2 (โครงสร้างหลักสูตรและเนื้อหา), เกณฑ์ที่ 3 (แนวทางการจัดการ เรียนการสอน) และเกณฑ์ที่ 7 (สิ่งอำนวยความสะดวกและโครงสร้างพื้นฐาน) ซึ่งในแต่ละคณะมีค่า APE สูงในหัวข้อที่ แตกต่างกัน แสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละคณะที่อาจต้องพิจารณาปรับกระบวนการประเมินหรือทบทวน การกำหนดน้ำหนักในบางเกณฑ์

จากผลการทดลองประยุกต์ใช้แบบจำลองในบริบทของหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุม จึงสามารถ สรุปได้ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง และสามารถใช้เป็นเครื่องมือ ประกอบการตัดสินใจสำหรับการประเมินคุณภาพการศึกษาที่มีความแม่นยำ เป็นธรรม และตรวจสอบได้ตามแนวทาง ของ AUN-QA

อภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยและเกณฑ์ที่มีผลกระทบต่อการประกันคุณภาพการศึกษา ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็น ถึงความเหมาะสมของการนำกระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบฟัซซี (FAHP) ร่วมกับเกณฑ์ AUN-QA มาใช้ประเมิน คุณภาพระดับคณะในมหาวิทยาลัย โดยการวิเคราะห์พบว่า ค่าความสอดคล้องของคำถามในแบบสอบถาม (IOC) มีค่าสูง

แสดงถึงความถูกต้องของเนื้อหา และค่าความเชื่อมั่นของเครื่องมือวัดที่ได้จาก Cronbach's Alpha อยู่ในเกณฑ์ดี (มากกว่า 0.8) แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความน่าเชื่อถือในการวัดผล

นอกจากนี้ ผลการให้ค่าน้ำหนักของปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปัจจัยด้าน ผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง และ แนวทางการจัดการเรียนการสอน ได้รับน้ำหนักสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Buacharoen and Somsathan, 2022) ที่ระบุว่าการจัดการเรียนการสอนเป็นหัวใจของการประกันคุณภาพระดับคณะ ส่วนการเปรียบเทียบค่าคะแนน การประเมินเดิมกับค่าคะแนนจากโมเดล FAHP พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (APE) โดยรวมอยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้มีความแม่นยำสูง

ผลการวิจัยยืนยันบทบาทของ FAHP ในการจัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลเชิงคุณภาพและการตีความของผู้ประเมิน ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของ AHP แบบดั้งเดิม (Buckley, 1985; Chang, 1996) งานวิจัยนี้จึงเติมเต็ม ช่องว่างทางวิชาการด้วยการเสนอแบบจำลองที่ผสานวิธีการตัดสินใจเชิงปริมาณกับกรอบ AUN-QA เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำ และตรวจสอบได้ ทำให้โมเดลนี้เป็นฐานทฤษฎีใหม่สำหรับการประเมินคุณภาพระดับคณะ อีกทั้ง เนื่องจาก AUN-QA เป็นมาตรฐานสากล โมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้ในมหาวิทยาลัยอื่น เพื่อสร้างระบบประกันคุณภาพที่เทียบเคียงได้อย่างเป็นมาตรฐาน ทั้งนี้ การนำไปใช้ควรปรับค่าน้ำหนักให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละสถาบันเพื่อสะท้อนคุณภาพการศึกษาได้อย่างแม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการเก็บข้อมูลกับผู้เชี่ยวชาญ ผู้วิจัยควรนำเทคนิคเดลฟาย (Delphi Technique) มาใช้เพื่อเป็นวิธีการแสวงหาข้อมูลความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในที่จะทำการศึกษา ซึ่งผู้เชี่ยวชาญจะตอบแบบสอบถามด้วยการกลั่นกรองอย่างละเอียด รอบคอบ และสอดคล้องกันในรูปแบบสอบถามแต่ละข้อ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการรวมความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญหลายฝ่าย ซึ่งอาจมีมุมมองที่หลากหลายเกี่ยวกับปัจจัยคุณภาพในการจัดการศึกษา

2. การกำหนดปัจจัยและเกณฑ์การประเมิน ควรขยายเกณฑ์ประเมินให้ครอบคลุมมิติด้านผลลัพธ์การเรียนรู้ของนักศึกษา และความยั่งยืนของการจัดการศึกษา เช่น การติดตามศิษย์เก่า การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อให้การประเมินครอบคลุมและสะท้อนคุณภาพได้รอบด้านยิ่งขึ้น

3. การเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ควรศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลอง FAHP กับวิธีการทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ เช่น เทคนิค Fuzzy Delphi หรือ Neuro-Fuzzy Inference System เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำความสอดคล้อง และความเหมาะสมของแต่ละวิธีในบริบทของการประกันคุณภาพ

4. ข้อจำกัดด้านบริบท ผลการวิจัยนี้อ้างอิงจากข้อมูลของมหาวิทยาลัยศรีปทุมเพียงแห่งเดียว จึงควรทดสอบซ้ำในมหาวิทยาลัยอื่น เพื่อยืนยันความทั่วไปของโมเดล

5. การลดอคติและการใช้ควบคู่กับการประเมินเชิงคุณภาพ แม้ FAHP จะช่วยลดอคติของผู้ประเมินโดยใช้การเปรียบเทียบแบบมีโครงสร้าง แต่ไม่สามารถตัดอคติได้ทั้งหมด จึงควรใช้ควบคู่กับการทบทวนเชิงคุณภาพและการประชุมของคณะกรรมการ เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนสภาพจริงได้รอบด้าน

เอกสารอ้างอิง

- Afolayan, A. H., Ojokoh, B. A., and Adetunmbi, A. O. (2020). Performance analysis of fuzzy analytic hierarchy process multi-criteria decision support models for contractor selection. *Scientific African*, 9, 1-12.
- Anuwong, K., Supasutheekul, A., Yuu-na-sin, W., Supakarn, N., Damnui, P., and Sawatwipachai, P. (2022). Understanding of internal quality assessors towards the essence of ASEAN University Network Quality Assurance (AUN-QA) criteria at the programme level. *Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology*, 14(28), 28–35.
- ASEAN University Network. (2020). *Guide to AUN-QA assessment at programme level (Version 4.0)*. ASEAN University Network.
- Buacharoen, P., and Somsathan, P. (2022). Guidelines for quality assurance at program level. *Panya Journal*, 29(3), 142–155.
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247.
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649-655.
- Dolly, V. P., and Mukhaiyar, R. (2020). Concept of curriculum evaluation in education program of electrical engineering using AUN-QA as benchmarking. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 3(1), 1–5.
- Ha, T. T., Hoai, L. L., and Lee, Y. D. (2015). A fuzzy AHP model for selection of consultant contractor in bidding phase in Vietnam. *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 5(2), 35–43.
- Johnson, O.C.B. (2017). The Impact of ASEAN University Network-Quality Assurance (AUN-QA) Assessment on the Quality of Educational Programmes. In: Tan, C., Goh, T. (eds) *Theory and Practice of Quality and Reliability Engineering in Asia Industry*. Springer, Singapore, 87-97. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3290-5_8
- Lee, S. H. (2010). Using fuzzy AHP to develop intellectual capital evaluation model for assessing their performance contribution in a university. *Expert Systems with Applications*, 37(7), 4941–4947.
- Nazari, A., Vandadian, S., and Abdirad, H. (2016). Fuzzy AHP model for prequalification of engineering consultants in the Iranian public procurement system. *Journal of Management in Engineering*, 33(2), 04016042.
- Pawan, P., and Lertpaitoonpan, W. (2018). Appraisal of not wearing personal protective equipment during construction work. *The Proceedings of the 23rd National Conference on Civil Engineering*, Nakhon Nayok, Thailand, July 18–20, 2018, 1–7.

- Saipia, S., and Pawan, P. (2022). A fuzzy analytic hierarchy process-based model for technical evaluation in contractor selection for construction projects. *Journal of Architecture, Design and Construction*, 4(3), 213–231.
- Shukri, F. A. A., Ali, F., Alias, A., and Nasir, N. A. A. M. (2021). Application of Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) For Teaching Quality Evaluation at Defence Foundation Centre. *ZULFAQAR Journal of Defence Science, Engineering and Technology*, 4(2), 68-81.
- Sripatum University. (2023). *Internal quality assurance handbook at programme level based on SPU: AUN-QA criteria (Version 4)*. Sripatum University.
- Surapanpairoj, S., and Pawan, P. (2022). Pre-registration contractor selection model for irrigation construction. *Sripatum Review of Science and Technology*, 14, 21–32.
- Yin, Q. (2013). An analytical hierarchy process model for the evaluation of college experimental teaching quality. *Journal of Technology and Science Education*, 3(2), 59–65.
- Yu, Y., and Qiu, J. (2022). Construction and application of the talent training system in colleges and universities based on the fuzzy analytic hierarchy process. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 1-10.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.

นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริดต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด

พรหมพัทธ์ บุญรักษา¹, อนุสรณ์ ผ่องประภา², สมมาตร ทองคำ², มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม²,
อนุวิท ลิมาวงศ์ปราณี³, อนุวัต ลิมาวงศ์ปราณี³, อีระพงษ์ บุญรักษา^{3,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Received: 1 November 2025

Revised: 25 December 2025

Accepted: 26 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของมุมเอียงและทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด เพื่อให้ นักศึกษาสามารถมีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยระบบถูกติดตั้งที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลรัตนโกสินทร์ ต.ศาลายา จ.นครปฐม ละติจูด 13.7958 °N ลองจิจูด 100.3228 °E ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 250 วัตต์ จำนวน 1 แผง เชื่อมต่อกับโหลดจำลองขนาด 4 โอห์ม วิธีการดำเนินงานส่วนที่ 1) ทำการปรับทิศทาง ของแผงประกอบด้วย ทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก จากนั้นทำการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 0°, 15°, 30°, 45° และ 60° และทำการบันทึกค่าความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ทำการทดลองวันที่ 23-24 กรกฎาคม 2568 ตั้งแต่เวลา 08.00-16.00 น. ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศใต้ และขนาดมุมเอียง 15° ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 211.04 วัตต์ รองลงมาคือที่มุมเอียง 0°, 30°, 45° และ 60° ให้ค่า กำลังไฟฟ้าสูงสุด 194.60, 153.47, 149.84 และ 102.65 วัตต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเลือก มุมเอียงและทิศทางที่เหมาะสมมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในส่วนที่ 2) ได้ดำเนินการประเมินความพึงพอใจโดยใช้เทคนิคการสุ่มแบบเจาะจงเป็นนักศึกษาที่เข้าร่วมกิจกรรม การเรียนรู้จำนวน 25 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนลิเคิร์ต ผลการประเมินพบว่านักศึกษามีความพึงพอใจเฉลี่ย 4.52 จากระดับ 5 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ซึ่งระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก สะท้อนให้เห็นว่านวัตกรรมการเรียนรู้ ที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งเสริมความเข้าใจและเพิ่มทักษะการเรียนรู้ด้านพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: นวัตกรรมการเรียนรู้ เซลล์แสงอาทิตย์ มุมเอียง ทิศทาง กำลังไฟฟ้าสูงสุด

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: terapong.boon@rmutr.ac.th

An Experiential Learning Innovation for Analyzing the Impact of Tilt Angle and Orientation of Off-Grid Photovoltaic Panels on Maximum Power Generation

Promphak Boonraksa¹, Anusorn Phongprapa², Sommart Thongkom²,
Maneerat Chanasakolnityom², Anuwit Limawongpranee³, Anuwat Limawongpranee³,
Terapong Boonraksa^{3,*}

¹Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Mechanical Engineering, Bangkok Thonburi University

³School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Received: 1 November 2025

Revised: 25 December 2025

Accepted: 26 December 2025

Abstract

This research aimed to design and develop an experiential learning innovation to analyze the relationship between the tilt angle and orientation of photovoltaic (PV) panels and their effects on maximum power generation in an off-grid solar energy system. The proposed learning system was intended to enhance students' conceptual understanding of photovoltaic theory through hands-on experimentation and direct observation. The experimental system was installed at Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya Campus, Nakhon Pathom Province, Thailand (latitude 13.7958°N, longitude 100.3228°E). A single 250 W photovoltaic panel was connected to a simulated resistive load of 4 Ω . The research methodology consisted of two main phases. In the first phase, the PV panel orientation was adjusted toward the north, south, east, and west, while the tilt angle was varied at 0°, 15°, 30°, 45°, and 60°. Solar irradiance and electrical power output were recorded during the experimental period conducted on 23–24 July 2025, from 8:00 a.m. to 4:00 p.m. The experimental results indicated that a south-facing photovoltaic panel with a tilt angle of 15° produced the maximum power output of 211.04 W. This was followed by tilt angles of 0°, 30°, 45°, and 60°, which yielded maximum power outputs of 194.60 W, 153.47 W, 149.84 W, and 102.65 W, respectively. These findings demonstrate that the appropriate selection of panel tilt

angle and orientation has a direct impact on enhancing the power generation efficiency of off-grid photovoltaic systems. In the second phase, student satisfaction with the experiential learning activity was evaluated using purposive sampling, involving 25 students who participated in the learning activities. A Likert-scale questionnaire was employed for data collection. The evaluation results revealed a high level of satisfaction, with a mean score of 4.52 from 5, and a standard deviation of 0.50. This outcome reflects that the developed learning innovation effectively promotes students' understanding and practical skills in solar energy systems.

Keywords: Experiential Learning Innovation, Photovoltaic Cells, Tilt Angle; Panel Orientation, Maximum Power Output

*Corresponding Author; E-mail: terapong.boo@rmutr.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานสะอาดที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก และเป็นทรัพยากรที่ไม่มีวันหมด พลังงานจากดวงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงผ่านกระบวนการของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon) ภายใต้หลักการทำงานที่เมื่อแสงตกกระทบกับชั้นสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และเกิดการแยกประจุ ส่งผลให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง (U.S. Energy Information Administration, 2025; U.S. Department of Energy, 2025; Amornrat and Methanan, 2017)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมพลังงานสะอาด แต่การเรียนการสอนด้านพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับอุดมศึกษายังเผชิญข้อจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะการเน้นเนื้อหาทางทฤษฎีมากกว่าการลงมือปฏิบัติจริง ทำให้นักศึกษาขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ หรือ มุมเอียงของแผง และทิศทางการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการผลิตพลังงาน มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของตำแหน่งและมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์ต่อปริมาณรังสีและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยตรงบนพื้นที่มหาวิทยาลัยในไทย พบว่าแผงที่ติดตั้งมุมต่างกันจะให้ค่าพลังงานต่างกัน โดยมุมเอียงที่เหมาะสมจะเปลี่ยนไปตามเวลาในปี และพลังงานไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงเที่ยงวัน โดยค่ารังสีแสงอาทิตย์ในพื้นที่อยู่ระหว่าง $850\text{--}930\text{ W/m}^2$ และหากติดตั้งมุมและทิศทางไม่เหมาะสมกับพื้นที่จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงอย่างเห็นได้ชัด (Thonghirun and Nilkamjorn, 2012; Yasmini et al., 2025) ปัจจัยเหล่านี้เป็นเรื่องพื้นฐานที่สำคัญของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แต่กลับเป็นหัวข้อที่มักไม่ได้รับการทดลองในสถานการณ์จริง มีแต่สอนกันตามทฤษฎี เนื่องจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และงบประมาณ การขาดสื่อการสอนเชิงปฏิบัติจริงนี้จึงเป็น ปัญหาสำคัญ (Problem Statement) ที่นำไปสู่ความจำเป็นในการพัฒนาเครื่องมือทางการศึกษาที่ตอบโจทย์ทั้งการเรียนรู้และการปฏิบัติ

ภาคการศึกษา โดยเฉพาะในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ จึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาบุคลากรที่มีสมรรถนะสอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรมพลังงานสะอาด การจัดการเรียนรู้ที่ดีจึงต้องไม่นำเสนอเพียงทฤษฎี แต่ต้องส่งเสริมให้นักศึกษาได้ทดลองจริง ได้วิเคราะห์ ได้วัดผล และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะช่วยให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกและนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงได้ การเรียนรู้เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ในเชิงปฏิบัติการจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาทักษะด้านความรู้ (Knowledge) ทักษะการปฏิบัติ (Skills) และเจตคติที่ดีต่อพลังงานสะอาด (Attitude) การออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ให้ผู้เรียนได้สร้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก ทดลองวัดประสิทธิภาพภายใต้สภาวะต่าง ๆ วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริง จะช่วยเสริมสร้างทักษะการคิดเชิงระบบ (Systems Thinking) การคิดวิเคราะห์ (Analytical Thinking) และการแก้ปัญหาเชิงสร้างสรรค์ (Creative Problem Solving) ซึ่งเป็นทักษะสำคัญในศตวรรษที่ 21 (Carnevale et al., 2013; World Economic Forum, 2020)

แนวทางการเรียนรู้เชิงสร้างสรรค์ด้วยการปฏิบัติ (Innovative Experimental Learning) อาศัยรากฐานจากทฤษฎี Constructivism ของ Piaget และ Vygotsky (Piaget, 1952; Vygotsky, 1978) ที่เน้นให้ผู้เรียนสร้างองค์ความรู้ผ่านประสบการณ์ตรงมากกว่าการรับสารแบบผู้ฟัง การเรียนรู้แบบลงมือทำจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในบริบทของการเรียน

พลังงานแสงอาทิตย์ (Phadungphon, 2025; Daoruang and Jantakoon, 2024; Chanthi and Sawangmek, 2024) โดยผู้เรียนจะเห็นความเชื่อมโยงระหว่างฟิสิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ วิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และระบบตรวจวัดควบคุม (Northern Illinois University, 2025) อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรม (Literature Review) พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์มักมุ่งเน้นไปที่ การหามุมเอียงที่เหมาะสม (Optimal Tilt Angle), การวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบ, การจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือการพัฒนาโมเดลทำนายกำลังผลิต ซึ่งมีเป้าหมายเชิงวิศวกรรมหรือเชิงเทคนิคเป็นหลัก แต่ยังมีงานศึกษาน้อยมากที่นำองค์ความรู้ดังกล่าวมาพัฒนาเป็นสื่อการสอนหรือชุดทดลองที่ให้นักศึกษาศึกษาจากสถานการณ์จริง ช่องว่างนี้สะท้อนว่า แม้จะมีข้อมูลเชิงเทคนิคจำนวนมาก แต่ยังคงขาด นวัตกรรมการเรียนรู้ ที่ช่วยเชื่อมโยงทฤษฎีกับประสบการณ์ตรงของผู้เรียนอย่างแท้จริง

กระบวนการเรียนรู้เชิงสร้างสรรค์ด้วยการปฏิบัติไม่เพียงให้ผู้เรียนทำตามขั้นตอน แต่ส่งเสริมให้ได้ทดลอง คิด วิเคราะห์ และเรียนรู้จากความผิดพลาด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการปฏิบัติงานจริงในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า หรือ วิศวกรรมพลังงาน เมื่อผู้เรียนได้ออกแบบการทดลอง ปรับเปลี่ยนมุมเอียง และทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วิเคราะห์ผลการผลิตไฟฟ้าที่ได้ตามสภาวะความเข้มแสงจริง และนำข้อมูลไปใช้แก้ปัญหา นักศึกษาจะเกิดทักษะการคิดขั้นสูง เช่น Critical Thinking และ Complex Problem Solving (Thornhill-Miller, 2023; World Economic Forum, 2020)

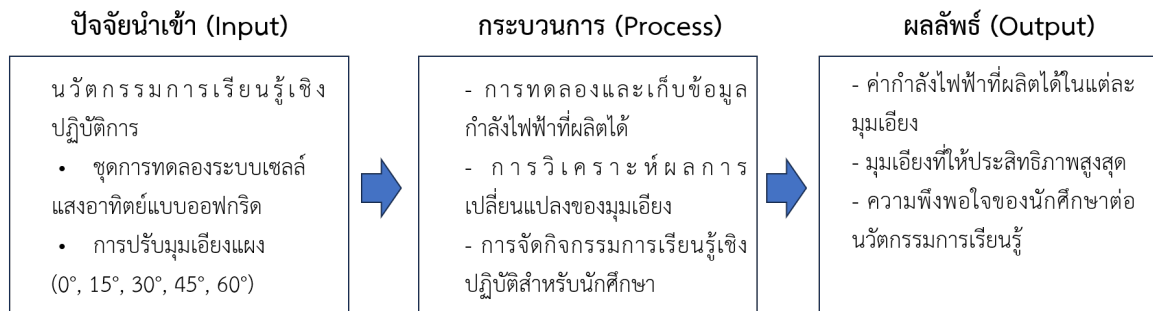
ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริดที่ใช้เป็นนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการที่ตอบโจทย์ทั้งด้านการเรียนการสอนและการพัฒนาทักษะทางวิศวกรรมในโลกปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้าง นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการสำหรับการศึกษาผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับมุมเอียงและทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้สภาพแสงธรรมชาติ
3. เพื่อประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการใช้นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้น

กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน การมีชุดการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการที่สามารถจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อกำลังผลิตได้จริง จะช่วยให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเป็นรูปธรรม และสามารถประยุกต์ใช้ความรู้สู่การออกแบบและพัฒนาระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปอย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

แบบแผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองและการประเมินการเรียนรู้ โดยมุ่งเน้นการพัฒนานวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า

ตัวอย่าง

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเป็นการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) หมายถึง การเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยใช้วิจารณญาณของผู้ทำวิจัย เพื่อให้ได้กลุ่มที่มีคุณสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยโดยเฉพาะ (Kittinorarat and Acherayawathana, 2024; Inthamat et al., 2023) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกจากนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ดำเนินการประเมินความพึงพอใจการใช้งานนวัตกรรมการเรียนรู้ จำนวน 25 คน (n=25)

เครื่องมือวิจัย

1. ออกแบบเครื่องมือวิจัย (แบบสอบถามความพึงพอใจ) เพื่อใช้ในการประเมินกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้มาตรประมาณค่าของลิเคิร์ต (Likert Scale) 5 ระดับ (Inthamat et al., 2022) ประเมินความพึงพอใจในด้านต่างๆ ประกอบไปด้วย 4 ด้าน ได้แก่ ด้านความเข้าใจหลักการและเนื้อหา ด้านการทดลองและการปฏิบัติ ด้านทักษะการวิเคราะห์และการแก้ปัญหา และด้านความพึงพอใจทั่วไป โดยการแปลผลค่าเฉลี่ยของแบบประเมินคุณภาพและแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยกำหนดช่วงคะแนนระดับคุณภาพและระดับความพึงพอใจที่ได้ ดังนี้

0.00 - 1.00	หมายถึง ระดับคุณภาพ หรือระดับความพึงพอใจ น้อยที่สุด
1.01 - 2.00	หมายถึง ระดับคุณภาพ หรือระดับความพึงพอใจ น้อย
2.01 - 3.00	หมายถึง ระดับคุณภาพ หรือระดับความพึงพอใจ ปานกลาง
3.01 - 4.00	หมายถึง ระดับคุณภาพ หรือระดับความพึงพอใจ มาก
4.01 - 5.00	หมายถึง ระดับคุณภาพ หรือระดับความพึงพอใจ มากที่สุด

2. ตรวจสอบเครื่องมือวิจัยโดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 5 ท่าน โดยใช้วิธีการคัดเลือกจาก ผู้ที่สำเร็จการศึกษาในสาขาวิชาที่สัมพันธ์กับนวัตกรรมที่สร้างขึ้น หรือพิจารณาจากประสบการณ์ความเชี่ยวชาญในการทำงานที่มีความสัมพันธ์กับนวัตกรรมการเรียนรู้ที่สร้างขึ้น โดยใช้เทคนิคการหาค่าความเที่ยงตรงรายข้อของแบบทดสอบโดยใช้

ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้พิจารณา (Index of Item-Objective Congruence: IOC) ซึ่งค่า IOC เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย (Tuntavanitch and Jindasri, 2018)

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การออกแบบและพัฒนาชุดทดลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์

1) ชุดทดลองเป็นระบบออฟกริด (Off-grid PV System) ขนาดเล็กที่ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดหลายผลึก (Polycrystalline Silicon) ขนาดกำลังสูงสุด 250 วัตต์ จำนวน 1 แผง เชื่อมต่อกับโหลดจำลองขนาด 4 โอห์ม (ใช้ตัวต้านทานขนาด 20 โอห์ม 50 วัตต์ต่อขนาดกันจำนวน 5 ตัว) ซึ่งมีพารามิเตอร์ของแผงแสดงดังตารางที่ 1 และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

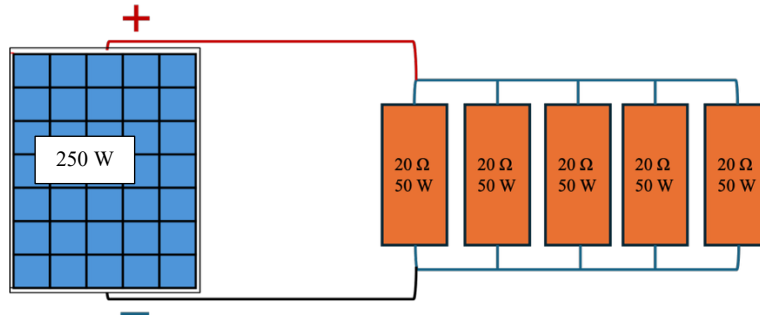
พารามิเตอร์	ขนาด
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{MP})	250 W
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{MP})	30.30 V
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{MP})	8.27 A
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{OC})	38.19 V
กระแสลัดวงจร (I_{SC})	8.65 A

ตารางที่ 2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์	จำนวน
1. เซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 250 W	1 แผง
2. โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter)	1 เครื่อง
3. แอมป์มิเตอร์ (Ammeter)	1 เครื่อง
4. เครื่องวัดค่าความเข้มของแสง (UT383 Digital Lux Meter)	1 เครื่อง
5. ตัวต้านทานขนาด 20 โอห์ม 50 วัตต์	5 ตัว

2) ชุดทดลองสามารถปรับมุมเอียง (Tilt Angle) ของแผงได้หลายระดับและปรับทิศทางได้ 4 ทิศทาง ประกอบด้วยทิศเหนือ ใต้ ตะวันออกและตะวันตก เพื่อให้ผู้เรียนสามารถศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางของแผงที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า (Power Generation Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์

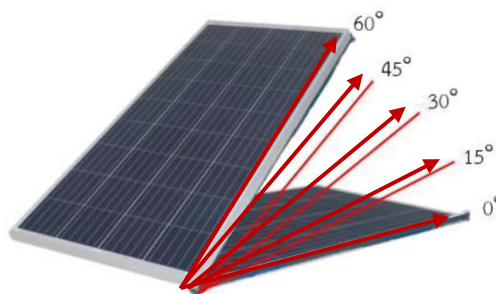
3) การออกแบบชุดทดลองเน้นความปลอดภัย ใช้งานง่าย และเหมาะสมกับการเรียนการสอนเชิงปฏิบัติการ ชุดปฏิบัติการที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชุดปฏิบัติการที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้น

2. การทดลองและเก็บข้อมูล

- 1) ทำการปรับทิศทางของแผง 4 ทิศทางประกอบด้วยทิศเหนือ ได้ ตะวันออกและตะวันตก
- 2) ทำการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 0° , 15° , 30° , 45° และ 60° ดังแสดงในภาพที่ 3
- 3) วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละมุมเอียงโดยบันทึกค่าเป็น วัตต์ (W) (ใช้แคลมป์มิเตอร์ในการวัดกระแสและแรงดันเพื่อนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าแล้วบันทึกผลทำการเก็บข้อมูลทุก 30 นาที โดยเริ่มจาก เริ่มจากเวลา 08.00-16.00 น. วันที่ 23-24 กรกฎาคม 2568 แสดงตัวอย่างการวัดดังภาพที่ 4 และส่วนค่าความเข้มแสงใช้เครื่องวัดค่าความเข้มแสง UT380 Digital Lux Meter) แสดงตัวอย่างการวัดดังภาพที่ 5



ภาพที่ 3 การปรับมุมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระดับต่างๆ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการวัดค่าแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 5 ตัวอย่างการวัดค่าความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4. การทดลองดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจริง เพื่อให้ผลการทดลองสะท้อนสถานการณ์จริง

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองใช้สถิติพรรณนา ได้แก่ ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่ออธิบายลักษณะและแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้มุมเอียงและทิศทางที่แตกต่างกัน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาทำการทดลอง โดยนำคะแนนของแต่ละข้อมาคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) (Inthamat et al., 2022) เพื่อสรุปผลระดับความพึงพอใจในแต่ละด้านและวิเคราะห์ภาพรวมของนวัตกรรม

ผลการวิจัย

จากการทำวิจัยเรื่องนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางการติดตั้งที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด โดยมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางการติดตั้งในแต่ละช่วงเวลาต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังประเมินผลนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการที่สร้างขึ้น โดยใช้การวัดค่าความพึงพอใจและความสามารถในการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการของนักศึกษา ซึ่งได้แสดงรายละเอียดผลการทดสอบดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการเปลี่ยนแปลงของมุมและทิศทางการติดตั้งที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบผลของทิศทางการติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ทำการทดสอบโดยเก็บข้อมูลทุก 30 นาที เริ่มจากเวลา 08.00-16.00 น. วันที่ 23-24 กรกฎาคม 2568 โดยหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก ผลของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อปรับทิศทางแผงไปที่ทิศต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อปรับทิศทางแผงไปที่ทิศต่าง ๆ ตั้งแต่เวลา 8:00 น.-16:00 น. (ทำการทดสอบวันที่ 23 กรกฎาคม 2568)

เวลาทดสอบ	กำลังไฟฟ้า (W)			
	เหนือ	ใต้	ตะวันออก	ตะวันตก
08.00	42	71	122	24
08.30	56	94	149	28
09.00	72	114	163	44
09.30	91	153	198	59
10.00	112	182	195	72
10.30	129	195	178	95
11.00	155	216	164	125
11.30	162	218	156	136
12.00	164	228	152	142
12.30	161	224	144	154
13.00	154	219	119	173
13.30	135	198	102	205
14.00	108	168	83	212
14.30	92	154	72	197
15.00	64	127	49	182
15.30	56	94	36	149
16.00	41	68	24	118
เฉลี่ย	105.53	160.18	123.88	124.41

จากตารางที่ 3 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อติดตั้งที่ทิศใต้ รองลงมาคือทิศตะวันตก ทิศตะวันออก และทิศเหนือ ตามลำดับ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ 160.18 ,124.41 ,123.88 และ 105.53 วัตต์ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศใต้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดตลอดช่วงเวลาการทดสอบ เนื่องจากได้รับรังสีแสงอาทิตย์ในมุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะในช่วงเวลาใกล้เคียงวัน ขณะที่แผงที่หันไปทางทิศตะวันออกและตะวันตกให้กำลังไฟฟ้าสูงในช่วงเช้าและบ่ายตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์

ในส่วนการทดสอบผลของมุมต่อกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบมุมต่าง ๆ ประกอบด้วย 0, 15, 30, 45 และ 60 องศาจากแนวระดับ ทำการทดสอบระยะเวลา 8 ชั่วโมง เริ่มทดสอบเวลา 8:00 น.-16:00 น. วันที่ 24 กรกฎาคม 2568 หันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันตก ผลของความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4 และเมื่อนำไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อปรับแผงไปที่มุมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 6

ตารางที่ 4 ผลของความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อปรับแฉงไปทีมุมต่าง ๆ ตั้งแต่เวลา 8:00 น.-16:00 น. (ทำการทดสอบวันที่ 24 กรกฎาคม 2568)

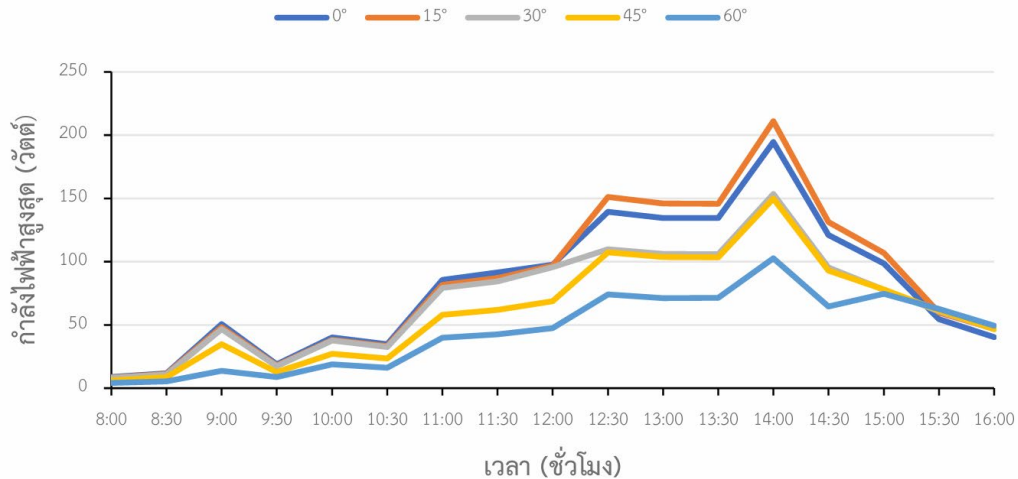
เวลาทดสอบ	ความเข้มของแสง (W/m ²)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (W)				
		0°	15°	30°	45°	60°
08.00 น.	105	8.86	8.44	8.19	5.99	4.14
08.30 น.	127	11.71	11.15	10.82	8.92	5.46
09.00 น.	137	50.66	48.25	46.80	34.62	13.64
09.30 น.	166	18.81	17.91	17.46	12.72	8.88
10.00 น.	290	40.08	38.17	37.62	27.10	18.90
10.30 น.	230	34.82	33.14	32.51	23.53	16.24
11.00 น.	288	85.66	81.58	79.15	57.92	39.97
11.30 น.	302	91.41	87.06	84.45	61.81	42.66
12.00 น.	440	97.67	96.83	95.69	68.75	47.45
12.30 น.	1100	139.38	151.15	109.92	107.32	74.06
13.00 น.	1076	134.57	145.94	106.13	103.62	71.12
13.30 น.	1112	134.38	145.73	105.97	103.47	103.47
14.00 น.	1051	194.60	211.04	153.47	149.84	102.65
14.30 น.	965	121.06	131.29	95.47	93.01	93.01
15.00 น.	646	98.59	106.92	77.75	77.91	74.62
15.30 น.	376	54.63	59.65	60.65	61.35	62.61
16.00 น.	668	40.46	46.96	46.67	46.74	49.48
เฉลี่ย	534.06	79.846	83.606	68.75	61.45	534.06

จากตารางที่ 4 ได้ทำการทดสอบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาช่วงเวลาที่มีความเข้มของแสงอาทิตย์ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด การทดลองได้ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่แผงสามารถผลิตได้

การทดสอบดำเนินการภายใต้รูปแบบการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในมุมเอียง 0°, 15°, 30°, 45° และ 60° โดยหันแผงไปทางทิศใต้ จากนั้นได้บันทึกค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา พร้อมคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มของแสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา ตั้งแต่เวลา 09.00 น. จนถึงช่วงเที่ยงวัน และเริ่มลดลงหลังจากเวลา 14.00 น.

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ช่วงเวลาที่ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดอยู่ระหว่างเวลา 11.00–13.00 น. โดยเฉพาะในกรณีที่ติดตั้งแผงในมุมเอียง 15 องศา หันไปทางทิศใต้ ซึ่งให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 211.04 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับมุมเอียงอื่น ๆ พบว่าการติดตั้งในมุมเอียงที่มากหรือน้อยเกินไป เช่น 0° หรือ 60° ส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้ลดลง เนื่องจากมุมตกกระทบของแสงไม่เหมาะสมต่อการดูดซับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในวันที่ 23 กรกฎาคม 2568 พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดทั้งวันมีค่าสูงกว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในวันที่ 24 กรกฎาคม 2568 เนื่องจากในวันที่ 24 กรกฎาคม 2568 สภาพอากาศมีเมฆมากซึ่ง บดบังแสงในบางช่วงเวลาทำให้ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้



ภาพที่ 6 กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อปรับแผงไปที่มุมต่าง ๆ ตั้งแต่เวลา 8:00 น.-16:00 น.

จากภาพที่ 6 กราฟแสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาปรากฏดังภาพที่ 6 ซึ่งสะท้อนให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานตามช่วงเวลาของวันและมุมเอียงที่ต่างกัน ผลดังกล่าวยืนยันว่าการเลือกมุมเอียงที่เหมาะสมกับทิศทางและช่วงเวลาของการรับแสงอาทิตย์มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2. ผลการประเมินผลนวัตกรรมการเรียนรู้

การวิเคราะห์และประเมินผลนวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเรื่อง การวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดำเนินการกับนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 25 คน โดยใช้แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจตามมาตราส่วนลิเคิร์ต 5 ระดับ เพื่อวัดความพึงพอใจของผู้เรียนในด้านต่าง ๆ ได้แก่

1. ด้านเนื้อหาความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์
2. ด้านกระบวนการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการและกิจกรรมการทดลอง
3. ด้านความเหมาะสมของสื่อและอุปกรณ์การเรียนรู้
4. ด้านความสามารถในการประยุกต์ใช้ความรู้ทางทฤษฎีสู่การปฏิบัติ
5. ด้านความพึงพอใจโดยรวมต่อนวัตกรรมการเรียนรู้

ผลการประเมินสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประเมินนวัตกรรมการเรียนรู้

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)	ระดับ ความพึงพอใจ
1. เนื้อหาความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของระบบ	4.56	0.51	มากที่สุด
2. กระบวนการเรียนรู้และกิจกรรมการทดลองมีความน่าสนใจ	4.58	0.47	มากที่สุด
3. สื่อและอุปกรณ์มีความเหมาะสมต่อการเรียนรู้	4.40	0.55	มาก
4. สามารถเชื่อมโยงความรู้ทางทฤษฎีกับการทดลองจริงได้	4.52	0.45	มากที่สุด
5. ความพึงพอใจโดยรวมต่อนวัตกรรมการเรียนรู้	4.55	0.53	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.52	0.50	มากที่สุด

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อนวัตกรรมการเรียนรู้ในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.52$, S.D. = 0.50) โดยรายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดคือ กระบวนการเรียนรู้และกิจกรรมการทดลองมีความน่าสนใจ ($\bar{X} = 4.58$) ลำดับถัดมาคือ เนื้อหาความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของระบบ ($\bar{X} = 4.56$) และ ความพึงพอใจโดยรวมต่อนวัตกรรมการเรียนรู้ ($\bar{X} = 4.55$) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่านวัตกรรมการเรียนรู้ที่สร้างขึ้นสามารถช่วยส่งเสริมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้เรียนมีความเข้าใจในหลักการทำงานของระบบ และเห็นว่าสื่อและกิจกรรมการเรียนรู้มีความเหมาะสม ช่วยกระตุ้นให้เกิดความสนใจและการมีส่วนร่วมในการเรียนรู้มากยิ่งขึ้น ผลการประเมินสะท้อนให้เห็นว่า นวัตกรรมการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งเสริมการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และการเรียนรู้จากการลงมือปฏิบัติจริง (Learning by Doing) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นักศึกษาสามารถเข้าใจหลักการของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม เกิดแรงจูงใจในการเรียนรู้ และมีทัศนคติที่ดีต่อการเรียนรู้ด้านพลังงานหมุนเวียน

อภิปรายผล

จากการทำวิจัยเรื่อง นวัตกรรมเรียนรู้เชิงปฏิบัติการเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงและทิศทางที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด ผลการวิจัยพบว่า การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันหน้าไปทางทิศใต้ให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดทั้งวันสูงสุด ตามด้วยทิศตะวันตก ตะวันออกและทิศเหนือ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Thonghirun and Nilkamjorn, 2012)

ในส่วนของการปรับมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีผลโดยตรงต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยมุมเอียงที่ 15 องศา ซึ่งหันไปทางทิศใต้ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 211.04 วัตต์ แสดงให้เห็นว่ามุมเอียงดังกล่าวเหมาะสมกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และสภาพแสงอาทิตย์ของพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้ มุมเอียงที่มากหรือน้อยเกินไป เช่น 0° หรือ 60° ส่งผลให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบต่อพื้นผิวแผงลดลง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีที่ว่า มุมระหว่างรังสีดวงอาทิตย์กับพื้นผิวแผงมีผลต่อการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างมุมเอียงต่าง ๆ พบแนวโน้มว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ในช่วงเวลานั้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Yasmini et al., 2025) งานวิจัยนี้ทดลองหลายมุมเอียงตั้งแต่ 0°–60° และพบว่ายังมีมุมเอียงไม่เหมาะสม

จะทำให้กำลังไฟฟ้าลดลง โดยบนสภาพแวดล้อมจริงแสดงให้เห็นว่ามมูมเล็กน้อย ๆ อาจให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ และยังชี้ให้เห็นว่าการกำหนดมมูมของแผงที่เหมาะสมตามฤดูกาลและทิศทางสามารถช่วยเพิ่มพลังงานที่ผลิตได้มากกว่า 10–20% เมื่อเทียบกับการติดตั้งในแนวราบ

ในด้านการเรียนรู้เชิงปฏิบัติการ การนำชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในกิจกรรมการเรียนรู้ส่งผลให้นักศึกษามีส่วนร่วมในการสังเกต วิเคราะห์ และตีความข้อมูลจริงจากการทดลอง นักศึกษาสามารถเชื่อมโยงความรู้เชิงทฤษฎีกับผลลัพธ์เชิงปฏิบัติได้อย่างเป็นรูปธรรม ผลการประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาจำนวน 25 คนอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยรวม 4.45 จากระดับ 5) สะท้อนให้เห็นว่ากิจกรรมการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) และเสริมสร้างทักษะทางวิศวกรรมด้านพลังงานหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติที่พัฒนาขึ้นไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความเข้าใจของผู้เรียนเกี่ยวกับผลกระทบของมมูมและทิศทางการติดตั้งที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น แต่ยังเป็นต้นแบบของการเรียนรู้ที่ผสมผสานระหว่างทฤษฎีและการทดลองจริง ซึ่งสามารถนำไปขยายผลใช้ในรายวิชาด้านพลังงานไฟฟ้า วิศวกรรมพลังงานหมุนเวียน หรือการเรียนรู้แบบ STEM/STEAM ได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1.1 ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรายวิชาที่เกี่ยวข้องกับพลังงานหมุนเวียน วิศวกรรมไฟฟ้า หรือระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้นักศึกษาได้เรียนรู้เชิงปฏิบัติและเข้าใจหลักการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองจริง ซึ่งช่วยส่งเสริมทักษะการคิดวิเคราะห์ การแก้ปัญหา และการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 หน่วยงานการศึกษา วิทยาลัย หรือมหาวิทยาลัย สามารถนำชุดนวัตกรรมการเรียนรู้ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน เพื่อเป็นสื่อการสอนรูปแบบใหม่ที่ช่วยเชื่อมโยงเนื้อหาทางทฤษฎีกับการปฏิบัติจริง ทั้งยังสามารถขยายผลไปใช้ในการอบรมหรือกิจกรรมส่งเสริมความรู้ด้านพลังงานหมุนเวียนแก่ชุมชนได้อีกด้วย

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ผู้ที่สนใจศึกษาสามารถขยายขอบเขตการศึกษาด้วยการทดลองในฤดูกาลต่าง ๆ หรือเปรียบเทียบการปรับมมูมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายภูมิภาคของประเทศไทย เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ มมูม และประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าในบริบทที่แตกต่างกัน

2.2 สามารถพัฒนาชุดนวัตกรรมการเรียนรู้ให้เชื่อมโยงกับเทคโนโลยีดิจิทัล เช่น ระบบ IoT, การบันทึกข้อมูลผ่านคลาวด์ หรือการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อเพิ่มศักยภาพของสื่อการเรียนรู้ และต่อยอดสู่การเรียนรู้แบบอัจฉริยะ (Smart Learning) ที่สอดคล้องกับแนวโน้มการศึกษายุคใหม่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มหาวิทยาลัยกรุงเทพมหานคร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Amornrat, P., and Methanan, A. (2017). *Design and installation of off-grid solar power generation system*. Bangkok: Siam University.
- Carnevale, A. P., Smith, N., and Melton, M. (2013). *21st century competencies for college and career readiness*. Washington, DC: Center on Education and the Workforce, Georgetown University.
- Chanthi, N., and Sawangmek, S. (2024). Promoting creativity and innovation through online learning based on the Double Diamond Design process combined with the Maker Space concept on the topic of equilibrium of forces among Grade 10 students. *MCU Social Science Review Journal*, 13(3), 300–313.
- Daoruang, N., and Jantakoon, J. (2024). The development of learning activities based on the design thinking approach to enhance scientific creativity for grade 3 students. *Journal of Graduate Research*, 15(1), 27–38.
- Intamas,P., Pansrinaun,W., Sakulpaisan,K., Sukthang,K., Chattunyakit,S.,and Boonraksa,P. (2022). Designing and building a coffee bean polishing machine using a smartphone controller. *Sripatum Review of Science and Technology*, 14(1), 169–183.
- Inthamas, P., Wanthong, U., and Boonraksa, P. (2023). Guidelines for the development of agricultural technology and innovation for goat farmers in the large-scale goat farming community enterprise of the Pak Phanang River Basin. *Journal of the Southern Vocational Education Institute* 1, 8(2), 31–40.
- Kittinorarat, J., and Acherayawathana, O. (2024). *Sampling in research: Principles, methods, and applications*. *Journal of Innovation in Educational Administration and Management*, 2(1), 39–55.
- Northern Illinois University. (2025). *Experiential learning: An instructional guide* [Internet]. DeKalb, IL: NIU. [Online]. Retrieved from: <https://www.niu.edu/citl/resources/guides/instructional-guide/experiential-learning.shtml>
- Phadungphon, T. (2025). Development of an online active learning model integrated with learning from practice to promote self-regulation and learning achievement on the topic of atomic electron structure among undergraduate students. *Journal of Curriculum and Instruction, Sakon Nakhon Rajabhat University*, 17(49), 105–116.
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International Universities Press.
- Thonghirun, P., and Nilkamjorn, T. (2012). *Effect of tilt angle of solar cell in SWU area*. *Science Essence Journal*, 28(2), 89–102.

- Thornhill-Miller, B. (2023). Creativity, critical thinking, communication, and collaboration: Assessment, certification, and promotion of 21st century skills for the future of work and education. *Frontiers in Education*, 8, 10054602. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.10054602>
- Tuntavanitch, P., and Jindasri, P. (2018). *The real meaning of IOC*. *Journal of the Faculty of Education, Mahasarakham University*, 24(2), 1–12.
- U.S. Department of Energy. (2025). *Solar photovoltaic cell basics* [Internet]. Washington, DC: U.S. DOE. [Online] Retrieved October 24, 2025, from: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>
- U.S. Energy Information Administration. (2025). *Solar energy and the environment* [Internet]. Washington, DC: U.S. EIA. [Online]. Retrieved October 24, 2025, from: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-energy-and-the-environment.php>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- World Economic Forum. (2020). *The future of jobs report 2020*. Geneva: World Economic Forum. *Energy*, 286, 128640.
- Yasmini, L. P. B., Valentina, D. N., and Risha, N. (2025). Effectiveness of Monocrystalline Solar Panel Tilt Angle to Output Power and Efficiency: Case study for Singaraja-Bali. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 14(1), 168–177.

การพยากรณ์ความเร็วลมด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก และปัญญาประดิษฐ์ แบบอธิบายได้: กรณีศึกษา จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย

เกศรา พลไชย¹, ธีระพงษ์ บุญรักษา², พรหมพัทธ์ บุญรักษา^{3,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Received: 3 November 2025

Revised: 24 December 2025

Accepted: 25 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงในจังหวัดภูเก็ตเพื่อสนับสนุนการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกควบคู่กับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมงย้อนหลังของเดือนมกราคม-ธันวาคม 2567 จำนวน 12 เดือน แบ่งเป็นชุดฝึกสอน 8 เดือน และชุดทดสอบ 4 เดือน ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (การถดถอยเชิงเส้น) มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 1.5679 ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 2.0739 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8113 ขณะที่แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.2581–0.5760 ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ชี้ให้เห็นว่าความเร็วลมย้อนหลังระยะสั้นและตัวแปรด้านเวลาเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความเร็วลม ซึ่งสะท้อนรูปแบบลมรายวันของพื้นที่ชายฝั่ง ผลการวิจัยยืนยันว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (การถดถอยเชิงเส้น) มีความเหมาะสมในการใช้พยากรณ์ความเร็วลมทั้งด้านความแม่นยำและความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ ผลการพยากรณ์ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบริหารจัดการพลังงานลมและเสถียรภาพของระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การพยากรณ์ความเร็วลม การเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก ปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้

*ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: promphak.b@rmutsb.ac.th

Wind Speed Forecasting using Machine Learning, Deep Learning, and Explainable AI: A Case Study of Phuket, Thailand

Kedsara Palachai¹, Terapong Boonraksa², Promphak Boonraksa^{3,*}

¹Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkok Thonburi University

²Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

³Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Received: 3 November 2025

Revised: 24 December 2025

Accepted: 25 December 2025

Abstract

This study aims to forecast hourly wind speed in Phuket Province to support wind power generation planning by applying and comparing machine learning and deep learning models in conjunction with explainable artificial intelligence (XAI) techniques. The dataset consists of historical hourly meteorological data covering a 12-month period from January to December 2024. The data were divided into an eight-month training set and a four-month testing set. Experimental results indicate that the machine learning model, particularly linear regression, outperformed deep learning models, achieving a mean absolute error (MAE) of 1.5679, a root mean square error (RMSE) of 2.0739, and a coefficient of determination (R^2) of 0.8113. In contrast, the deep learning models yielded R^2 values ranging from 0.2581 to 0.5760. XAI-based analysis reveals that short-term lagged wind speed variables and temporal features are the most influential factors affecting wind speed, reflecting the daily wind patterns characteristic of coastal areas. The findings confirm that the linear regression model is well suited for hourly wind speed forecasting in terms of both predictive accuracy and interpretability. The resulting wind speed forecasts can be effectively applied to wind energy management, storage planning, and enhancing the operational stability of wind power generation systems.

Keywords: Wind Speed Forecasting, Machine Learning, Deep Learning, Explainable Artificial Intelligence

*Corresponding Author; E-mail: promphak.b@rmutsb.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2543 เป็นต้นมา โลกได้ให้ความสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดอย่างจริงจัง ภายหลังการลงนามในพิธีสารเกียวโต พ.ศ. 2540 และความตกลงปารีส พ.ศ. 2558 หลายประเทศจึงเริ่มลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อบรรลุเป้าหมาย Net Zero Emission ภายในปี พ.ศ. 2593 (United Nations, 2015) จากรายงานของ Global Wind Energy Council ในปี พ.ศ. 2567 พบว่าพลังงานลมมีกำลังผลิตติดตั้งทั่วโลกเกินกว่า 1,000 กิกะวัตต์ (GW) และมีสัดส่วนในการผลิตไฟฟ้าราว 7% ของปริมาณไฟฟ้าทั่วโลก (GWEC, 2024) สอดคล้องกับรายงานของ International Energy Agency (2023) ซึ่งยืนยันว่าพลังงานลมเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เติบโตเร็วที่สุดในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (IEA, 2023) อย่างไรก็ตาม พลังงานลมมีลักษณะผันผวนและไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังการผลิตไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ หากไม่สามารถคาดการณ์ความเร็วลมล่วงหน้าอย่างแม่นยำ อาจเกิดความเสียหายต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าสำรอง (Ackermann, 2012)

ในประเทศไทย รัฐบาลได้บรรจุพลังงานลมไว้ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า PDP พ.ศ. 2567–2580 ซึ่งระบุว่าประเทศไทยมีกำลังผลิตจากพลังงานลมกว่า 1,500 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2567 และตั้งเป้าเพิ่มเป็น 3,000 เมกะวัตต์ในปี พ.ศ. 2580 เพื่อเสริมความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ (Electricity Generating Authority of Thailand., 2024) โดยเฉพาะพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน เช่น จังหวัดภูเก็ต ได้รับการระบุว่าเป็นทำเลที่มีศักยภาพด้านความเร็วลมสูง เหมาะสมกับการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2024) แต่พลังงานลมมีความไม่แน่นอนสูง ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ เช่น ความเร็วลม ความชื้น อุณหภูมิ และรังสีดวงอาทิตย์ หากไม่มีการพยากรณ์ความเร็วลมที่แม่นยำจะทำให้การวางแผนผลิตไฟฟ้า การจ่ายไฟเข้าสู่ระบบสายส่ง และการบริหารระบบกักเก็บพลังงานไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Li and Shi, 2010) วิธีการพยากรณ์แบบดั้งเดิม เช่น แบบจำลองการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข แบบจำลองอัตราถดถอยเชิงบูรณาการและค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และแบบจำลองการทำให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลแม้จะใช้ในทางอุตุนิยมวิทยา แต่ไม่สามารถรองรับลักษณะของข้อมูลที่มีความไม่เชิงเส้นและมีความสัมพันธ์ตามเวลาได้ดี (Hyndman and Athanasopoulos, 2021) ดังนั้นแนวคิดการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง เช่นแบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่มและแบบจำลองการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงชั้นและการเรียนรู้เชิงลึก เช่น โครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาว และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทางจึงได้รับความสนใจมากขึ้นในการพยากรณ์พลังงานลม (Friedman, 2001; Hochreiter and Schmidhuber, 1997) ถึงแม้โมเดลเหล่านี้จะให้ความแม่นยำสูงแต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าโมเดลตัดสินใจจากอะไร ดังนั้นงานวิจัยปัจจุบันจึงเริ่มนำปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ เช่นการจัดอันดับความสำคัญของตัวแปรด้วยการสลัค่า และ SHAP มาใช้เพื่อระบุตัวแปรใด เช่นความเร็วลมย้อนหลัง เวลาในหนึ่งวัน ความชื้น หรือรังสีดวงอาทิตย์ ส่งผลต่อค่าความเร็วลมมากที่สุด (Breiman, 2001)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Zhang et al., 2024), (Li et al., 2023), (Wang et al., 2022) พบว่างานวิจัยด้านการพยากรณ์ความเร็วลมส่วนใหญ่มุ่งเน้นการเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึก อย่างไรก็ตามยังขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบที่ประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองทั้งสองกลุ่มควบคู่กันในบริบทของพื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดภูเก็ตซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศเฉพาะตัว แม้ว่าการวิจัยจำนวนมากจะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมัยใหม่

สามารถให้ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง แต่ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพเชิงตัวเลขเป็นหลัก และขาดการอธิบายเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่แบบจำลองใช้ในการตัดสินใจพยากรณ์ ส่งผลให้การนำผลการพยากรณ์ไปใช้ในการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การบริหารจัดการระบบกักเก็บพลังงาน และการรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในเชิงปฏิบัติยังมีข้อจำกัด

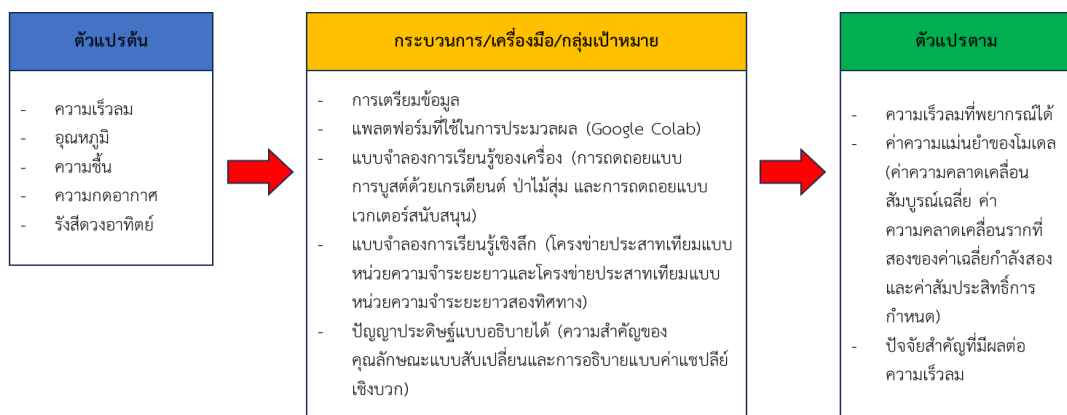
ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้และเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกในการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงในจังหวัดภูเก็ต โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจริง พร้อมทั้งประเมินความสามารถในการอธิบายผลของแบบจำลองด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ เพื่อระบุแบบจำลองที่ให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำสูงและสามารถอธิบายที่มาของผลลัพธ์ได้อย่างเหมาะสม อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการวางแผนพลังงานลม การบริหารจัดการระบบกักเก็บพลังงาน และการเสริมสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเสนอแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกในการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงของจังหวัดภูเก็ต โดยอาศัยข้อมูลสภาพอากาศจริง
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองแต่ละประเภท ด้วยตัวชี้วัด ค่า MAE, RMSE และ R^2 เพื่อระบุว่าโมเดลใดมีความแม่นยำสูงที่สุดในการพยากรณ์ความเร็วลม
3. เพื่อใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์ความเร็วลม และสนับสนุนการประยุกต์ใช้ผลการพยากรณ์ในการบริหารจัดการระบบพลังงานลมและระบบไฟฟ้า

กรอบแนวคิดในการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยมีทิศทางที่ชัดเจน และสามารถเชื่อมโยงระหว่างปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการ และผลลัพธ์ที่คาดหวังได้อย่างเป็นระบบ จึงมีความจำเป็นต้องกำหนด กรอบแนวคิดในการวิจัย ซึ่งเป็นแผนผังแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการพยากรณ์ความเร็วลมในจังหวัดภูเก็ตดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

เอกสาร ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพยากรณ์ความเร็วลมที่มีความแม่นยำมีบทบาทสำคัญต่อการประเมินศักยภาพพลังงานลม การดำเนินงานของระบบไฟฟ้า และการวางแผนพลังงานหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม ความเร็วลมมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ไม่คงที่ และมีความสับสน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาและบรรยากาศ ส่งผลให้วิธีการพยากรณ์เชิงสถิติแบบดั้งเดิมไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำได้อย่างเพียงพอ งานวิจัยในช่วงหลังจึงหันมาให้ความสนใจกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก และปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ เพื่อยกระดับทั้งความแม่นยำและความสามารถในการตีความผลลัพธ์ของแบบจำลอง

งานวิจัยของ Zhang et al. (2024) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาวร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ เพื่อพยากรณ์ความเร็วลม โดยใช้ตัวแปรด้านอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้น ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองดังกล่าวให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำกว่าแบบจำลองเชิงสถิติและแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ยังชี้ให้เห็นว่า ค่าความเร็วลมย้อนหลังในช่วงระยะสั้นประมาณ 1–3 ชั่วโมงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อผลการพยากรณ์ ซึ่งช่วยเพิ่มทั้งความแม่นยำและความสามารถในการตีความของแบบจำลอง

ในทำนองเดียวกัน Li et al. (2023) ได้ศึกษาการใช้แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมและตัวแปรอุตุนิยมวิทยา ภายใต้การแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกสอนร้อยละ 70 และการทดสอบร้อยละ 30 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทางให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าแบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวแบบทิศทางเดียวและแบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม เนื่องจากสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงเวลาทั้งในอดีตและอนาคตได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรนำเข้าเชิงลึกในด้านการอธิบายผลลัพธ์ของแบบจำลอง

ในส่วน Khortsriwong et al. (2023) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองคอนโวลูชัน แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว และแบบจำลองเชิงผสม เพื่อพยากรณ์กำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวแปรนำเข้า ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกสามารถลดข้อผิดพลาดในการพยากรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการทั่วไป และมีประสิทธิภาพสูงในการจัดการข้อมูลที่มีความผันผวน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาประเด็นด้านความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ของแบบจำลองอย่างเป็นระบบ

นอกจากนี้ Wang et al. (2022) ได้เสนอการใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักร่วมกับแบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว เพื่อพยากรณ์ความเร็วลมจากตัวแปรอุตุนิยมวิทยาหลายตัว โดยแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกสอนร้อยละ 75 และการทดสอบร้อยละ 25 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักช่วยลดสัญญาณรบกวนของข้อมูลและเพิ่มความแม่นยำของการพยากรณ์อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การลดมิติข้อมูลดังกล่าวส่งผลให้ความสามารถในการตีความเชิงกายภาพของตัวแปรนำเข้าแต่ละตัวลดลง

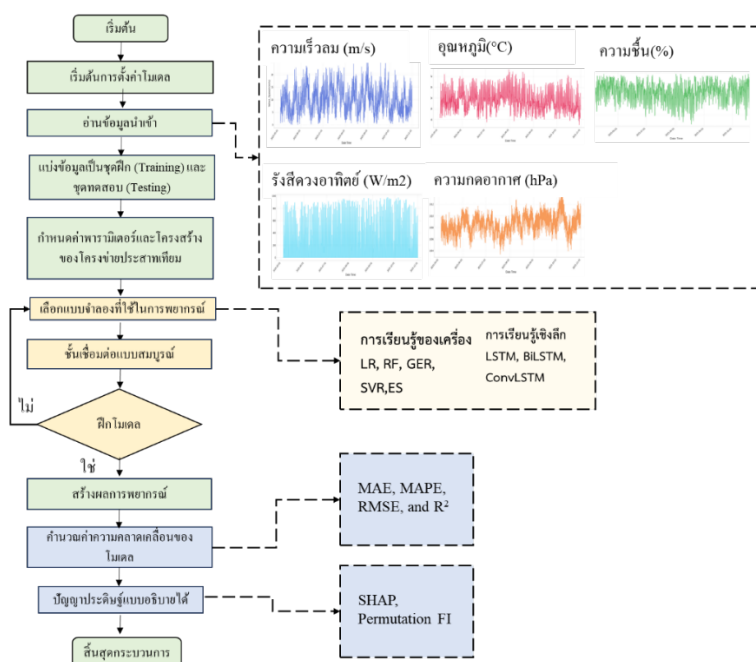
ในกลุ่มแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง Ahmad et al. (2021) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเวกเตอร์สนับสนุนสำหรับการถดถอย แบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม และแบบจำลองการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงชั้น โดยใช้ข้อมูลความเร็วลมและตัวแปรอุตุนิยมวิทยา ผลการทดลองภายใต้การแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกสอนร้อยละ 70 และการทดสอบร้อยละ 30 พบว่าแบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่มให้ผลการพยากรณ์

ดีที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองการเพิ่มพูนเชิงชั้น ขณะที่แบบจำลอง
เวกเตอร์สนับสนุนสำหรับการถดถอยให้ผลการพยากรณ์ต่ำที่สุด แม้ว่าแบบจำลองเชิงกลุ่มจะให้ความแม่นยำ
สูงกว่าแบบจำลองเดี่ยว แต่ยังมีข้อจำกัดในการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงเวลาในระยะยาวเมื่อเทียบกับแบบจำลอง
การเรียนรู้เชิงลึก

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มักใช้การแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึกสอน
และชุดทดสอบในสัดส่วนประมาณร้อยละ 70–80 และร้อยละ 20–30 ตามลำดับ เพื่อประเมินความสามารถของ
แบบจำลองบนข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ผลการศึกษาส่วนใหญ่ชี้ว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก โดยเฉพาะ
แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวและแบบจำลองต่อยอด เช่น แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง
และแบบจำลองผสมคอนโวลูชันกับหน่วยความจำระยะยาว ให้ความแม่นยำสูงในการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา
เนื่องจากสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงเวลาที่ซับซ้อนได้ดี ขณะเดียวกัน แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเชิง
กลุ่ม เช่น แบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่มและแบบจำลองการเพิ่มพูนเชิงชั้น ยังคงเป็นทางเลือกที่มี
ประสิทธิภาพสำหรับข้อมูลที่มีความผันผวนสูง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยล่าสุดเริ่มให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้
ปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ เพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือของผลการพยากรณ์ ซึ่งยังคงเป็นประเด็น
ที่ต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะในบริบทของพื้นที่ชายฝั่งทะเลของประเทศไทย

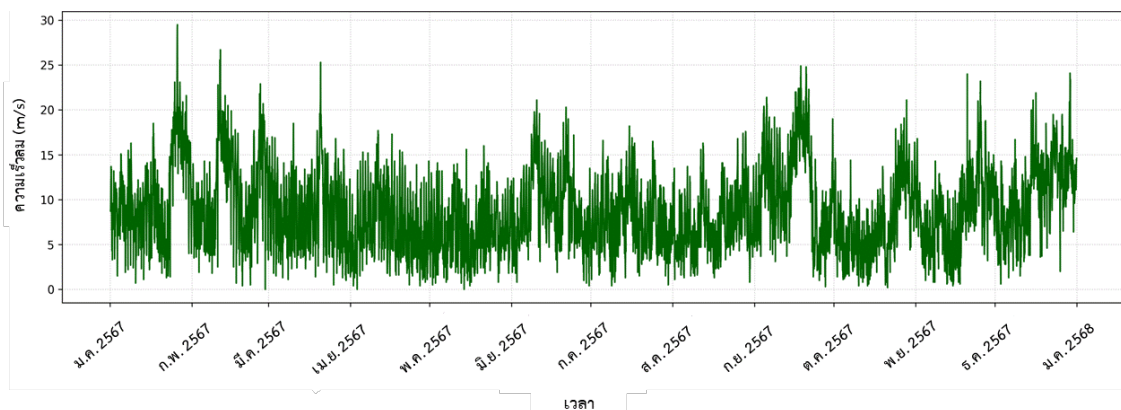
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยประยุกต์ใช้เทคนิค การเรียนรู้ของเครื่อง เรียนรู้เชิงลึก
ในการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมง และทำการวิเคราะห์เชิงลึกด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้เพื่อ
ประเมินความสำคัญของคุณลักษณะโครงสร้างการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักแสดงดัง
ภาพที่ 2

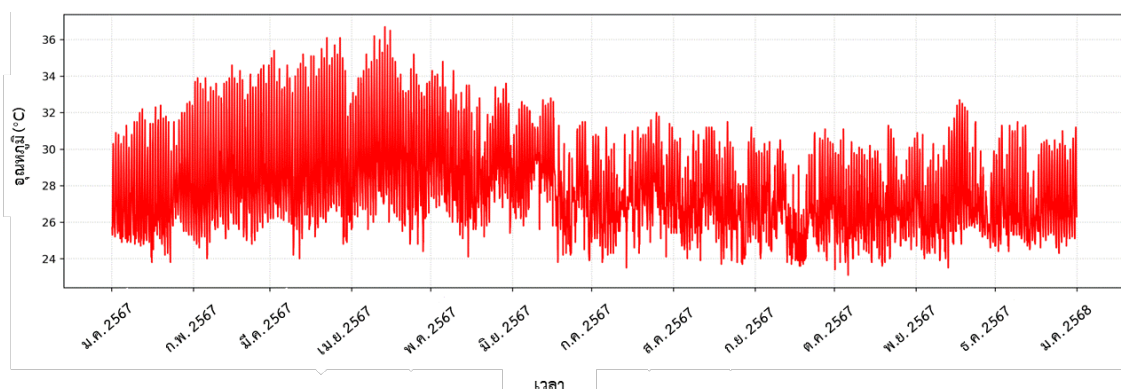


ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองพยากรณ์โพลไฟฟ้า

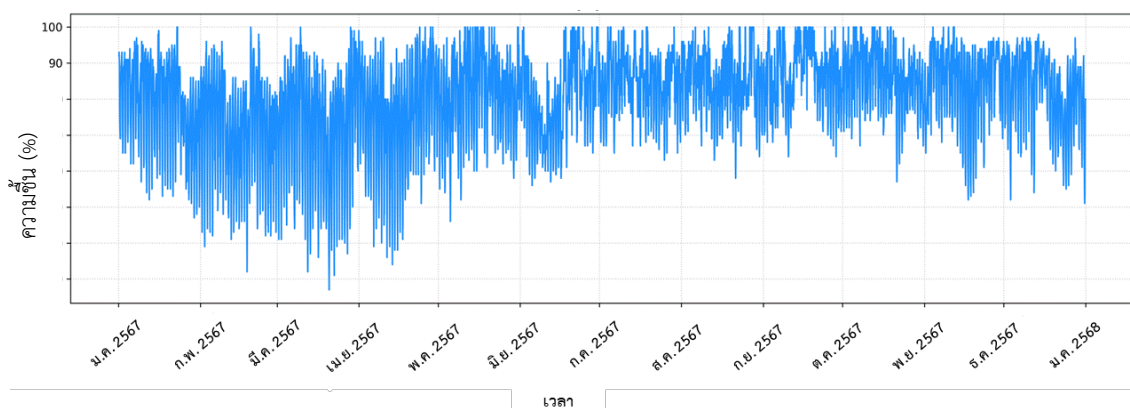
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลสภาพอากาศในอดีต รายชั่วโมงสำหรับพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยรวบรวมข้อมูลย้อนหลังรวม 12 เดือนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 จำนวนชั่วโมงประมาณ 8,784 ชั่วโมง ใช้ข้อมูลจาก Open-Meteo API โดยเน้นช่วงเวลาที่มีความผันผวนของลมตามฤดูกาล เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบที่หลากหลาย ข้อมูลใช้ในการพยากรณ์ประกอบด้วย ความเร็วลมในภาพที่ 3 อุณหภูมิในภาพที่ 4 ความชื้นในภาพที่ 5 ความกดอากาศในภาพที่ 6 และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ในภาพที่ 7



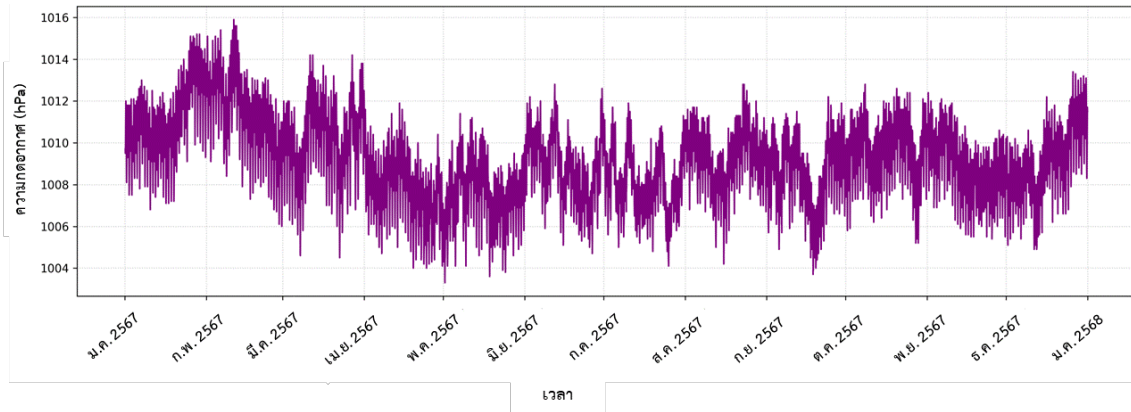
ภาพที่ 3 ข้อมูลความเร็วลมของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต



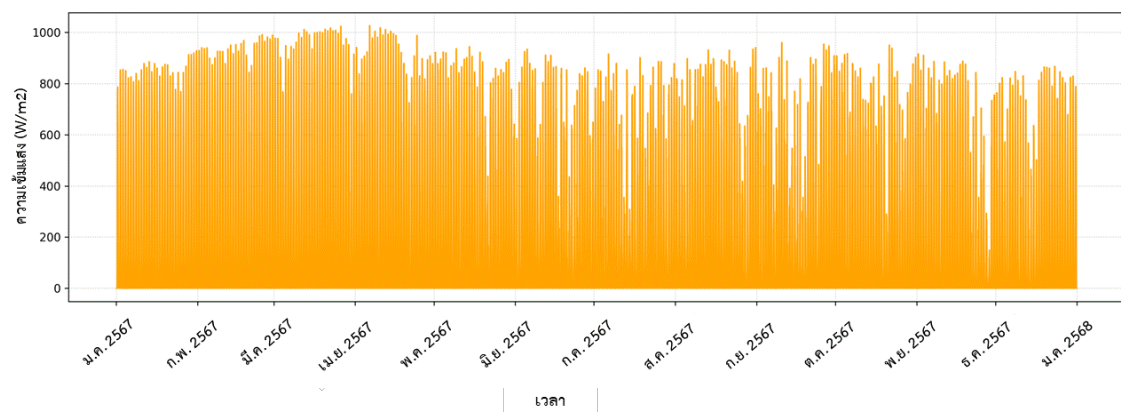
ภาพที่ 4 ข้อมูลอุณหภูมิของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต



ภาพที่ 5 ข้อมูลความชื้นของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต



ภาพที่ 6 ข้อมูลความกดอากาศของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต



ภาพที่ 7 ข้อมูลความเข้มการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ของพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยใช้ข้อมูลฝึกสอนช่วงเวลา 8 เดือนแรก ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2567 ประมาณ 5,856 ชั่วโมง เพื่อให้โมเดลเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลและชุดทดสอบ 4 เดือนหลังตั้งแต่เดือนกันยายน ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ประมาณ 2,928 ชั่วโมง ใช้ตรวจสอบความสามารถในการพยากรณ์ของโมเดลที่ไม่เคยเห็นมาก่อนในอัตราส่วน 80:20 โดยชุดตรวจสอบถูกใช้เพื่อติดตามประสิทธิภาพของแบบจำลองระหว่างการฝึก และใช้เทคนิค early stopping เพื่อป้องกันปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป

เพื่อให้โมเดลเรียนรู้รูปแบบเชิงเวลาของความเร็วลมได้ดีขึ้น จึงมีการสร้างคุณลักษณะเพิ่มเติมได้แก่ ค่าความเร็วลมย้อนหลัง โดยสร้างตัวแปรแทนค่าความเร็วลมในอดีตก่อนเวลา t เพื่อให้โมเดลเข้าใจแนวโน้มก่อนหน้าดังสมการที่ 1

$$\text{Wind Speed Lag}_n(t) = \text{Wind Speed}(t - n) \quad (1)$$

โดย

t	คือ	เวลาปัจจุบัน (ชั่วโมงที่ต้องการทำนายความเร็วลม)
N	คือ	จำนวนชั่วโมงย้อนหลัง
$\text{Wind Speed}_{(t-n)}$	คือ	ค่าความเร็วลมที่บันทึกไว้เมื่อ n ชั่วโมงก่อนหน้า
$\text{Wind Speed Lag}_n(t)$	คือ	ตัวแปรใหม่ที่นำมาใช้ในการฝึกโมเดล เพื่อให้โมเดลเรียนรู้จากอดีต

เพื่อสะท้อนว่า ความเร็วลมในปัจจุบันมีความต่อเนื่องจากข้อมูลในอดีตนอกจากนี้เพื่อให้โมเดลเข้าใจรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของลมในวงจรรายวันได้สร้างตัวแปรเวลาแบบไซน์และโคไซน์สมการที่ 2

$$\begin{aligned} Hour_sin(t) &= \sin\left(\frac{2\pi \times Hour(t)}{24}\right) \\ Hour_cos(t) &= \cos\left(\frac{2\pi \times Hour(t)}{24}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

โดย

Hour(t) คือ ชั่วโมงของวัน
sin,cos คือ ฟังก์ชันคณิตศาสตร์สำหรับแทนลักษณะวนซ้ำของเวลา

จากสมการที่ 2 เพื่อช่วยให้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึกให้สามารถเรียนรู้ลักษณะเป็นคาบได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากเตรียมข้อมูลและสร้างคุณลักษณะแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง 2 กลุ่ม คือ การเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งใช้ไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก

ประเภทของปัญหาประติษฐ์	แบบจำลอง	ไฮเปอร์พารามิเตอร์
แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก	แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	fit_intercept = default
	แบบจำลองป่าสุ่ม	n_estimators = 250, random_state = 42, n_jobs = -1
	แบบจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพแบบไล่ระดับ	n_estimators = 250, learning_rate = 0.05, max_depth = 3, random_state = 42
	แบบจำลองเวกเตอร์สนับสนุนสำหรับการถดถอย	kernel = RBF, C = 10, gamma = scale
	แบบจำลองการปรับเรียบเชิงเลขชี้กำลัง	trend = additive, seasonal = additive, seasonal_periods = 24, initialization = estimated
แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง	แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว	units = 50, activation = ReLU, optimizer = Adam, loss = MSE, epochs = 50, batch_size = 32, look-back = 24 ชม.
	แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง	units = 50, activation = ReLU, optimizer = Adam, loss = MSE, epochs = 50, batch_size = 32, look-back = 24 ชม.

หลังจากกำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่สอดคล้องกันสำหรับแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น แบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม แบบจำลองการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงชั้น แบบจำลองเวกเตอร์สนับสนุนสำหรับการถดถอย และแบบจำลองการปรับเรียบเชิงเลขชี้กำลัง รวมถึงแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ได้แก่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาว แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง และแบบจำลองคอนโวลูชันหนึ่งมิติร่วมกับหน่วยความจำระยะยาว เพื่อใช้ในการพยากรณ์ความเร็วลมแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองแต่ละประเภทอย่างเป็นระบบ เพื่อให้สามารถระบุได้ว่าแบบจำลองใดมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับชุดข้อมูลของจังหวัดภูเก็ต

เครื่องมือวิจัย

การประเมินผลในงานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดที่ครอบคลุมทั้งด้านความคลาดเคลื่อนและความแม่นยำของแบบจำลองพยากรณ์ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการพยากรณ์และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยตัวชี้วัดดังกล่าวสามารถสะท้อนทั้งระดับความผิดพลาดเชิงปริมาณและความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายข้อมูลจริงได้อย่างเหมาะสม (Dawan et al., 2020; Khortsriwong et al., 2023)

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้วัดค่าเฉลี่ยของความแตกต่างเชิงสัมบูรณ์ระหว่างค่าที่แบบจำลองพยากรณ์กับค่าจริง โดยให้ความสำคัญกับความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทุกจุดอย่างเท่าเทียมกัน ข้อดีของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์คือสามารถตีความได้ง่าย เนื่องจากมีหน่วยเดียวกับข้อมูลจริง เช่น เมตรต่อวินาทีสำหรับความเร็วลม และมีความไวต่อค่าผิดปกติน้อยกว่าตัวชี้วัดที่อาศัยการยกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนทำให้เหมาะสำหรับการประเมินความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยโดยรวมของแบบจำลองในเชิงปฏิบัติค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์คำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

โดย

y	คือ	ค่าจริงของความเร็วลม
$\hat{y}_i$	คือ	ค่าที่แบบจำลองพยากรณ์
n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เป็นตัวชี้วัดที่คำนึงถึงขนาดของความคลาดเคลื่อนเป็นพิเศษ เนื่องจากการยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าพยากรณ์และค่าจริงก่อนนำมาหาค่าเฉลี่ยและถอดราก ดังนั้นรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย จึงมีความไวต่อค่าคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงผิดปกติมากกว่า ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ การใช้ รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ช่วยให้สามารถตรวจสอบได้ว่าแบบจำลองมีข้อผิดพลาดรุนแรงในช่วงเวลาหรือไม่ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในงานพยากรณ์ความเร็วลมที่ค่าความคลาดเคลื่อนสูงอาจส่งผลกระทบต่อการวางแผนผลิตพลังงานและความมั่นคงของระบบไฟฟ้ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริง โดยมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ค่าติดลบไปจนถึง 1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายข้อมูลจริงได้ดี ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0 หมายถึงแบบจำลองมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากการเดาค่าเฉลี่ยของข้อมูล และหากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าติดลบ แสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเดาค่าเฉลี่ย ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองยังไม่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ในกรณีนั้นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

โดย

	$\bar{y}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง
ถ้า	$R^2=1$		แบบจำลองทำนายได้สมบูรณ์ที่สุด
ถ้า	$R^2=0$		แบบจำลองแย่มาก ๆ กับการเดาค่าเฉลี่ย
ถ้า	$R^2<0$		แบบจำลองแย่กว่าการเดาค่าเฉลี่ย

แม้แบบจำลองให้ค่าการพยากรณ์ที่แม่นยำสูงแต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าโมเดลตัดสินใจจากอะไร ดังนั้น เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการพยากรณ์ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เทคนิค XAI ได้แก่ การจัดอันดับความสำคัญของตัวแปรด้วยการสลับค่า และ SHAP ในการวิเคราะห์บทบาทของตัวแปรอิสระแต่ละตัวต่อการคาดการณ์ความเร็วลม

การวัดความสำคัญของตัวแปรด้วยการสลับค่า ใช้วัดว่าหากสลับค่าของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งแล้วทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของโมเดลเพิ่มขึ้นมากเพียงใดดังสมการที่ 5 (Breiman, 2001)

$$FI_i = Error_{shuffled}(X_i) - Error_{original} \quad (5)$$

โดย

FI_j	คือ	ค่าความสำคัญของตัวแปรที่ j
$Error_{original}$	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของโมเดลก่อนสลับค่า
$Error_{shuffled}(X_j)$	คือ	ค่าคลาดเคลื่อนหลังจากสลับข้อมูลของตัวแปร X_j แบบสุ่ม
หากค่า FI_j สูง	คือ	ตัวแปรนั้นมีความสำคัญมาก เพราะการสลับค่าทำให้โมเดลแม่นยำน้อยลง

การอธิบายแบบจำลองด้วยค่าเชปเพลย์ ใช้คำนวณว่า ตัวแปรแต่ละตัวมีส่วนเพิ่มหรือลดค่าผลลัพธ์จากโมเดลมากน้อยเพียงใด โดยอิงจากทฤษฎีเกมแบบร่วมมือสมการที่ 6 (Shapley, 1953; Lundberg and Lee, 2017)

$$\phi_j = \sum_{S \subseteq F \setminus \{j\}} \frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!} [f(S \cup \{j\}) - f(S)] \quad (6)$$

โดย

F	คือ	ชุดของตัวแปรทั้งหมดในแบบจำลอง
S	คือ	ชุดย่อยของตัวแปรที่ไม่รวมตัวแปร j
f(s)	คือ	ค่าพยากรณ์เมื่อใช้เฉพาะตัวแปรในชุด S

$f(SU_{(j)})$ คือ ค่าพยากรณ์หลังจากเพิ่มตัวแปร j
 ϕ_j คือ ค่าผลกระทบของตัวแปร j (SHAP Value)

ผลการวิจัย

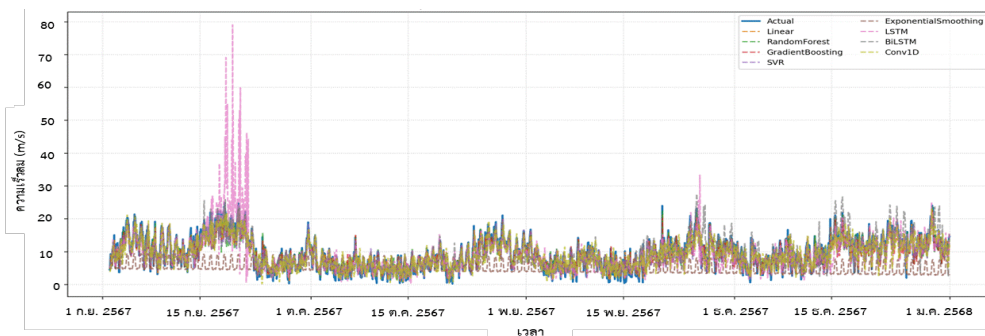
หลังจากดำเนินการพัฒนาแบบจำลองและประเมินประสิทธิภาพด้วยค่าชี้วัด ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) แล้วงานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการพยากรณ์ความเร็วลมจากแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึก โดยเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากข้อมูลสภาพอากาศในจังหวัดภูเก็ตผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลประเมินประสิทธิภาพด้วยค่าชี้วัด

โมเดล	MAE	RMSE	R^2
แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	1.5679	2.0739	0.8113
แบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม	1.6255	2.1420	0.7987
แบบจำลองการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงชั้น	1.6742	2.1796	0.7916
แบบจำลองการถดถอยด้วยเวกเตอร์สนับสนุน	1.6827	2.2263	0.7826
แบบจำลองการทำให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	4.9705	6.2585	-0.7184
แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว	2.5618	4.1205	0.2581
แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง	2.3716	3.1152	0.5760
แบบจำลองผสมคอนโวลูชันหนึ่งมิติกับหน่วยความจำระยะยาว	2.4593	3.1792	0.5584

จากตารางที่ 2 พบว่า แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องให้ผลการพยากรณ์ความเร็วลมดีกว่ากลุ่มแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกอย่างชัดเจน โดยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นให้ผลดีที่สุด มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 1.5679 รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 2.0739 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8113 แสดงว่าสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริงได้มากกว่าร้อยละ 81 รองลงมาคือแบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่มและแบบจำลองการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงชั้น ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจใกล้เคียงกัน ขณะที่แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก โดยเฉพาะแบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง ให้ผลการพยากรณ์ดีที่สุดในกลุ่มนี้ แต่ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่อง

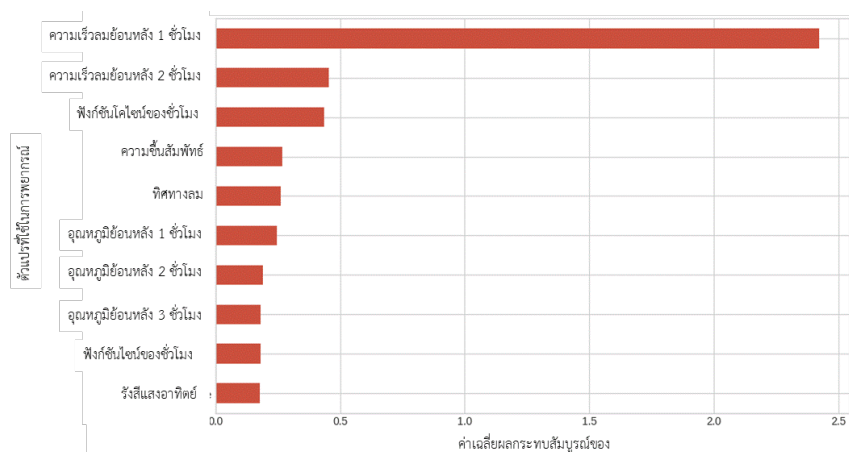
งานวิจัยนี้ได้ทดสอบ Diebold–Mariano โดยเปรียบเทียบชุดค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับแบบจำลองตัวแทนในแต่ละกลุ่ม ทั้งกลุ่มการเรียนรู้ของเครื่องและกลุ่มการเรียนรู้เชิงลึก ภายใต้ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นให้ผลการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินด้วยค่าชี้วัดค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์, รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และยืนยันถึงความเหมาะสมของแบบจำลองดังกล่าวสำหรับการพยากรณ์ความเร็วลมในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต



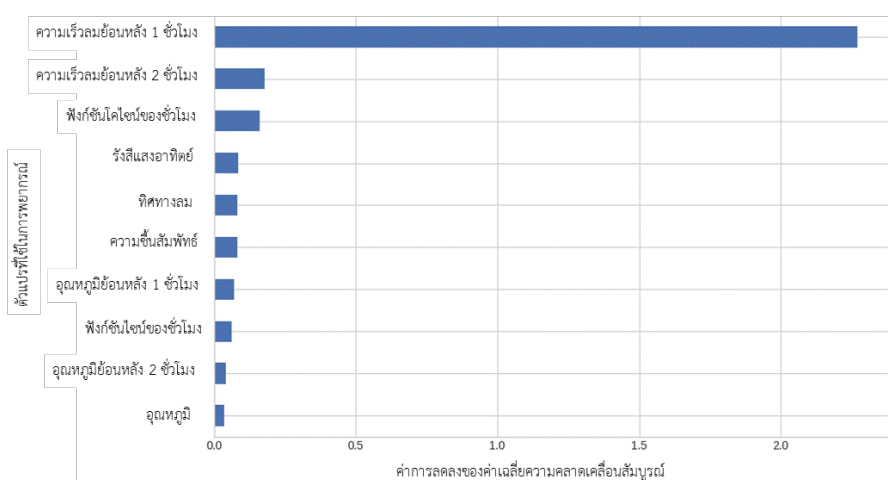
ภาพที่ 8 ผลการพยากรณ์ความเร็วลม

จากภาพที่ 8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วลมจริงกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของแบบจำลองต่าง ๆ พบว่า แบบจำลองในกลุ่มการเรียนรู้ด้วยเครื่อง ได้แก่ การถดถอยเชิงเส้น ป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม และการถดถอยด้วยการเพิ่มพูนเชิงซ้อน สามารถติดตามแนวโน้มของค่าความเร็วลมจริงได้ดี โดยเฉพาะในช่วงที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงในระดับต่ำถึงปานกลาง ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินเชิงปริมาณที่แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.5679 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงถึง 0.8113

ในขณะที่แบบจำลองการถดถอยด้วยเวกเตอร์สนับสนุนให้ผลการพยากรณ์ด้อยกว่ากลุ่มข้างต้นเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 1.6827 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.7826 ส่วนแบบจำลองการทำให้เรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลให้ผลการพยากรณ์ต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงถึง 4.9705 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นลบ (-0.7184) ซึ่งสะท้อนว่าแบบจำลองไม่เหมาะสมกับข้อมูลความเร็วลมที่มีความผันผวนและไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับกลุ่มแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ได้แก่ แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทาง และแบบจำลองผสมคอนโวลูชันหนึ่งมิติกับหน่วยความจำระยะยาว พบว่าให้ผลการพยากรณ์ต่ำกว่าแบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่อง โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์อยู่ในช่วง 2.3716–2.5618 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.2581–0.5760 ทั้งนี้ แม้จะใช้ข้อมูลฝึกเป็นระยะเวลา 8 เดือน และข้อมูลทดสอบ 4 เดือน แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกยังไม่สามารถแสดงศักยภาพได้อย่างเต็มที่ ซึ่งอาจเกิดจากการกำหนดช่วงเวลาย้อนกลับเพียง 24 ชั่วโมงที่ยังไม่เพียงพอในการจับรูปแบบเชิงลำดับระยะยาวของความเร็วลม โดยความสำคัญของตัวแปรต่อแบบจำลอง Gradient Boosting Regressor จากการวิเคราะห์ด้วย SHAP (10 อันดับแรก) แสดงดังรูปที่ 9 และความสำคัญของตัวแปรจากการสลับลำดับคุณลักษณะสำหรับแบบจำลอง Gradient Boosting Regressor (10 อันดับแรก) แสดงดังรูปที่ 10



ภาพที่ 9 ความสำคัญของตัวแปรต่อแบบจำลอง Gradient Boosting Regressor
จากการวิเคราะห์ด้วย SHAP (10 อันดับแรก)



ภาพที่ 10 ความสำคัญของตัวแปรจากการสลับลำดับคุณลักษณะสำหรับแบบจำลอง
Gradient Boosting Regressor (10 อันดับแรก)

จากภาพที่ 9 และภาพที่ 10 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ ทั้งจากค่า SHAP และวิธีการสลับลำดับคุณลักษณะสำหรับแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น พบว่าผลการวิเคราะห์จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกัน โดยชี้ให้เห็นว่า ความเร็วลมย้อนหลัง 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการพยากรณ์ความเร็วลม สะท้อนถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลมในจังหวัดภูเก็ตที่มีความต่อเนื่องในระยะสั้น ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของพื้นที่ชายฝั่งทะเล นอกจากนี้ ตัวแปรด้านเวลาในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของชั่วโมงมีบทบาทสำคัญในลำดับถัดมา แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมในจังหวัดภูเก็ตมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวัน ขณะที่ตัวแปรด้านสภาพอากาศอื่น ๆ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ทิศทางลม และอุณหภูมิย้อนหลัง มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์ในระดับรองลงมา ส่วนรังสีแสงอาทิตย์มีความสำคัญต่ำ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีผลต่อความเร็วลมทางอ้อมมากกว่าทางตรงในบริบทพื้นที่ศึกษา

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถอธิบายการพยากรณ์ความเร็วลมได้อย่างสอดคล้องกับลักษณะภูมิอากาศของจังหวัดภูเก็ต และงานวิจัยมีการวิเคราะห์และอธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์ความเร็วลมด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ ทั้งนี้ ผลการพยากรณ์ที่สามารถอธิบายได้อย่างโปร่งใสยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การควบคุมระบบกักเก็บพลังงาน และการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในจังหวัดภูเก็ตในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสนใจกับการพยากรณ์ความเร็วลมโดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกในบริบทที่หลากหลาย งานของ (Wang et al., 2022) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหน่วยความจำระยะยาวสามารถให้ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูงเมื่อใช้ข้อมูลระยะยาวหลายปีร่วมกับการลดมิติข้อมูลด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก แม้ผลลัพธ์จะมีประสิทธิภาพดีในเชิงตัวเลข แต่การศึกษาดังกล่าวไม่ได้ให้ความสำคัญกับการอธิบายบทบาทของตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อการตัดสินใจของแบบจำลองอย่างชัดเจน ในทำนองเดียวกัน (Hong et al., 2023) รายงานว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกและแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสามารถให้ผลการพยากรณ์ที่ใกล้เคียงกันเมื่อผสมผสานข้อมูลพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลขกับข้อมูลย้อนหลัง โดยพบว่าแบบจำลองการเพิ่มพูนเชิงชั้นให้ผลดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ยังไม่ได้ถูกเชื่อมโยงกับลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาในเชิงกายภาพอย่างเป็นระบบ ในบริบทของพื้นที่ชายฝั่ง (Zhang et al., 2021) ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองป่าการตัดสินใจแบบสุ่มมีความทนทานต่อความผันผวนของข้อมูลความเร็วลม และสามารถให้ผลการพยากรณ์ที่มีเสถียรภาพสูง ขณะเดียวกัน (Sankari et al., 2023) รายงานว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก เช่นแบบจำลองหน่วยความจำระยะยาวสองทิศทางมีประสิทธิภาพเหนือกว่าแบบจำลองเชิงเส้นเมื่อใช้ข้อมูลระยะยาวที่มีรูปแบบฤดูกาลชัดเจนแต่ประสิทธิภาพของแบบจำลองจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณข้อมูลฝึกไม่เพียงพอต่อการตีความผลลัพธ์ (Lundberg and Lee, 2017) ได้เสนอการใช้ค่า SHAP เพื่ออธิบายผลลัพธ์ของแบบจำลองอย่างโปร่งใสซึ่งแนวคิดดังกล่าวเริ่มได้รับการประยุกต์ใช้ในงานพยากรณ์พลังงานมากขึ้น แม้ว่างานวิจัยจำนวนมากยังไม่ได้บูรณาการการวิเคราะห์เชิงอธิบายเข้ากับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองอย่างครบถ้วน

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นภาพที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายฉบับ โดยพบว่าแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นให้ผลการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงของจังหวัดภูเก็ตดีที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 1.5679 รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 2.0739 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8113 ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ในกรณีของข้อมูลที่มีระยะเวลาเพียง 12 เดือนและมีความผันผวนสูงตามลักษณะภูมิอากาศชายฝั่ง แบบจำลองที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงเวลาระยะสั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกซึ่งต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากและรูปแบบฤดูกาลที่ชัดเจน

นอกจากนี้ การนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับผลการศึกษา โดยการวิเคราะห์ด้วยค่า SHAP และการสลับลำดับคุณลักษณะสามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าความเร็วลมย้อนหลังในช่วง 1 และ 2 ชั่วโมงมีอิทธิพลสูงสุดต่อผลการพยากรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเปลี่ยนแปลงของลมในระยะสั้นและหลักการทางอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ชายฝั่ง การตีความดังกล่าวช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองและเอื้อต่อการนำ

ผลลัพธ์ไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ดีกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ โดยเฉพาะระยะเวลาของข้อมูลที่ครอบคลุมเพียงหนึ่งปี ซึ่งอาจยังไม่สะท้อนรูปแบบฤดูกาลระยะยาวของความเร็วลมอย่างครบถ้วน รวมถึงการกำหนดช่วงเวลาย้อนกลับเพียง 24 ชั่วโมงและการปรับจูนไฮเปอร์พารามิเตอร์ของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่ยังอยู่ในขอบเขตจำกัด งานวิจัยในอนาคตจึงควรขยายช่วงเวลาของข้อมูลให้ครอบคลุมหลายปี ทดลองใช้หน้าต่างเวลาย้อนกลับที่ยาวขึ้น และพัฒนาแบบจำลองเชิงผสมระหว่างการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อเพิ่มทั้งความแม่นยำและความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ซึ่งในเชิงการประยุกต์ใช้ ผลการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำและสามารถอธิบายได้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการจัดทำระบบแจ้งเตือนการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมระยะสั้น การวางแผนการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า และการตัดสินใจของผู้ควบคุมระบบโครงข่ายไฟฟ้าในการรักษาเสถียรภาพของระบบในพื้นที่ ที่มีการใช้พลังงานลมเป็นสัดส่วนสูง

งานวิจัยนี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ในการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงของจังหวัดภูเก็ตโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกบนข้อมูลสภาพอากาศจริง ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแบบจำลองในกลุ่มการเรียนรู้ของเครื่องให้ผลการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกในบริบทของข้อมูลที่มีระยะเวลาและความผันผวนจำกัด โดยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นให้ผลดีที่สุดสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริงได้มากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมของแบบจำลองที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสำหรับการพยากรณ์ความเร็วลมรายชั่วโมงในพื้นที่ชายฝั่ง นอกจากนี้ การนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้มาช่วยให้อธิบายการวิเคราะห์และอธิบายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์ความเร็วลมได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าความเร็วลมย้อนหลังระยะสั้นและตัวแปรด้านเวลาเป็นปัจจัยสำคัญที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลมในจังหวัดภูเก็ตและหลักการทางอุตุนิยมวิทยา ผลลัพธ์ดังกล่าวช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ทำให้สามารถนำผลการพยากรณ์ไปใช้สนับสนุนการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม การบริหารจัดการระบบกักเก็บพลังงาน และการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเมื่อผสมผสานกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ สามารถตอบโจทย์ทั้งด้านความแม่นยำและการตีความผลลัพธ์ได้อย่างครบถ้วนและมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานลมและการวางแผนระบบไฟฟ้าจากพลังงานลมในพื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Ackermann, T. (2012). *Wind power in power systems*. Wiley.
- Ahmad, T., Zhang, D., and Huang, C. (2021). Wind speed prediction using machine learning techniques. *Energy Reports*, 7, 576–586.

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
- Dawan, P., Sriprapha, K., Kittisontirak, S., Boonraksa, T., Junhuathon, N., Titiroongruang, W., and Niemcharoen, S. (2020). Comparison of power output forecasting on the photovoltaic system using adaptive neuro-fuzzy inference systems and particle swarm optimization–artificial neural network model. *Energies*, 13(2), 1-18.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2024). *Thailand renewable energy outlook 2024*. Department of Alternative Energy Development and Efficiency.
- Electricity Generating Authority of Thailand. (2024). *Power development plan 2567–2580 (PDP 2024)*. Electricity Generating Authority of Thailand.
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232.
- Global Wind Energy Council. (2024). *Global wind report 2024*. GWEC.
- Hochreiter, S., and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
- Hong, Y., Zhou, Z., andamp; Zhao, J. (2023). Can we trust explainable AI in wind power forecasting? *Energy and AI*, 12, 100241.
- Hyndman, R. J., and Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice*. 3rd ed. OTexts.
- International Energy Agency. (2023). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. International Energy Agency.
- Khortsriwong, N., Boonraksa, P., Boonraksa, T., Fangsuwannarak, T., Boonsrirat, A., Pinthurat, W., and Marungsri, B. (2023). Performance of deep learning techniques for forecasting PV power generation: A case study on a 1.5 MWp floating PV power plant. *Energies*, <https://doi.org/10.3390/en16052119>
- Khortsriwong, N., Boonraksa, P., Boonraksa, T., Fangsuwannarak, T., Boonsrirat, A., Pinthurat, W., and Marungsri, B. (2023). Performance of deep learning techniques for forecasting PV power generation: A case study on a 1.5 MWp floating PV power plant. *Energies*, 16(5), 2119. <https://doi.org/10.3390/en16052119>
- Li, G., and Shi, J. (2010). Application of forecasting methods in wind power integration. *Renewable Energy*, 35(12), 2850–2859.
- Li, X., Chen, Y., and Sun, W. (2023). Short-term wind speed forecasting using optimized BiLSTM networks. *Applied Energy*, 334, 120653.
- Lundberg, S. M., and Lee, S. I. (2017). *A unified approach to interpreting model predictions*. In *Advances in neural information processing systems*, pp. 4765–4774.

- Sankari, S., Paramasivan, S. K., Arockiasamy, K., andamp; Senthivel, S. (2023). Deep learning for wind speed forecasting using Bi-LSTM with selected features. *Intelligent Automation andamp; Soft Computing*, 35(3), 3829–3844. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.030480>
- Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In H. W. Kuhn and A. W. Tucker (Eds.), *Contributions to the theory of games*. Princeton University Press.
- United Nations. (2015). *Paris agreement*. United Nations Treaty Series, 3156, 79.
- Wang, Q., Li, K., and Liu, S. (2022). Short-term wind speed prediction using PCA and LSTM. *Energy Conversion and Management*, 254, 115256.
- Zhang, Y., Liu, H., and Wang, J. (2024). Interpretable short-term wind speed forecasting using LSTM and SHAP. *Energy*, 286, 128640.

คำแนะนำในการเตรียมและการส่งต้นฉบับ

วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กองบรรณาธิการ วารสารศรีปทุมปริทัศน์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความยินดีที่จะรับบทความจากทุกท่าน เพื่อตีพิมพ์และเผยแพร่ในวารสาร เพื่อความสะดวกในการพิจารณา จึงขอแนะแนวทางการเตรียมต้นฉบับและส่งต้นฉบับ ดังนี้

ประเภทของบทความ

1. **บทความวิจัย (Research Article)** หมายถึง เป็นการนำเสนอผลการวิจัยอย่างเป็นระบบ กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย การดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย สรุปอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ
2. **บทความวิชาการ (Academic Article)** หมายถึง งานเขียนซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เป็นความรู้ใหม่ กล่าวถึง ความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ แนวทางการแก้ปัญหา มีการใช้แนวคิดทฤษฎี ผลงานวิจัยจากแหล่งข้อมูล เช่น หนังสือวารสารวิชาการ อินเทอร์เน็ต ประกอบการวิเคราะห์ วิจัย เสนอแนวทางการแก้ไข
3. **บทความปริทัศน์ (Review Article)** หมายถึง งานวิชาการที่ประเมินสถานะล่าสุดทางวิชาการ เฉพาะทางที่มีการศึกษาค้นคว้า มีการวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้ ทั้งทางกว้างและทางลึกอย่างทันสมัย โดยให้ข้อวิพากษ์ที่ชี้ให้เห็นแนวโน้มที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไป
4. **บทวิจารณ์หนังสือ (Book Review)** หมายถึง บทความที่วิพากษ์วิจารณ์เนื้อหาสาระ คุณค่า และคุณภาพ ของหนังสือ บทความ หรือผลงานสิ่งประดิษฐ์ โดยใช้หลักวิชาและดุลพินิจ อันเหมาะสม

องค์ประกอบของบทความ

1. **บทความวิจัย (Research Article)**
บทความวิจัย ประกอบด้วยหน้าชื่อเรื่อง บทคัดย่อ และเนื้อหาของบทความ โดยมีข้อมูลตามลำดับดังนี้ ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สังกัด (ภาควิชา คณะ สถาบัน) และอีเมล ของผู้เขียนสำหรับติดต่อ ในส่วนบทคัดย่อต้องระบุถึงแบบแผนการวิจัย วัตถุประสงค์ ประชากรและตัวอย่าง เครื่องมือวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และผลการวิจัย ความยาวไม่เกิน 250 คำ ในกรณีที่ต้นฉบับเป็นภาษาไทย ให้เขียนบทคัดย่อทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญของเรื่อง (Keywords) จำนวนไม่เกิน 5 คำ ในส่วนเนื้อหาของบทความ ให้เริ่มต้นจากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ กรอบแนวคิดในการวิจัย (ถ้ามี) สมมติฐานการวิจัย (ถ้ามี) วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย อภิปรายผล ข้อเสนอแนะ และกิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)
2. **บทความวิชาการ (Academic Article)**
บทความวิชาการ ประกอบด้วยชื่อเรื่อง บทคัดย่อ และเนื้อหาของบทความ โดยเรียงลำดับดังนี้ ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สังกัด (ภาควิชา คณะ สถาบัน) และอีเมลของผู้พิมพ์ สำหรับติดต่อ ในส่วนบทคัดย่อ ต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ หัวข้อที่น่าสนใจ สรุป และข้อเสนอแนะ โดยเนื้อหาในบทคัดย่อความยาวไม่เกิน 250 คำ ในกรณีที่ต้นฉบับเป็น

ภาษาไทย ให้เขียนบทคัดย่อทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญของเรื่อง (Keywords) จำนวนไม่เกิน 5 คำ ในส่วนเนื้อหาของบทความ ให้เริ่มต้นจากบทนำ ที่แสดงเหตุผลหรือที่มาของประเด็นที่ต้องการอธิบายหรือวิเคราะห์ ในส่วนเนื้อหาสาระ จะเป็นการอธิบายหรือวิเคราะห์ประเด็นตามหลักวิชาการ โดยมีการสำรวจเอกสารหรืองานวิจัย เพื่อสนับสนุนจนสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ในประเด็นนั้นได้ อาจเป็นการนำความรู้จากแหล่งต่างๆ มาประมวลร้อยเรียงเพื่อวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ โดยผู้เขียนสามารถแสดงทัศนะทางวิชาการของตนเองไว้อย่างชัดเจนด้วย ส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนสรุปและข้อเสนอแนะ มีการเขียนเอกสารอ้างอิงที่ครบถ้วนสมบูรณ์

3. บทความปริทัศน์ (Review Article)

บทความปริทัศน์ ประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สังกัด (ภาควิชา คณะ สถาบัน) และอีเมลของผู้เขียน สำหรับติดต่อ บทความปริทัศน์เป็นการนำเสนอภาพรวมของเรื่องที่นำเสนอ ในส่วนของเนื้อหาของบทความ ต้องมีบทนำ เพื่อกล่าวถึงความน่าสนใจของเรื่องที่นำเสนอ ก่อนเข้าสู่เนื้อหาในแต่ละประเด็น และต้องมีบทสรุปเรื่องที่เสนอ พร้อมข้อเสนอแนะจากผู้เขียนเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวสำหรับให้ผู้อ่านได้พิจารณาประเด็นที่น่าสนใจต่อไป ผู้เขียนควรตรวจสอบเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนออย่างละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อหาที่ใหม่ที่สุด ข้อมูลที่นำเสนอจะต้องไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะผู้อ่านที่อยู่ในสาขาของบทความเท่านั้น แต่ต้องนำเสนอข้อมูลที่ซึ่งผู้อ่านในสาขาอื่นสามารถเข้าใจได้

4. บทวิจารณ์หนังสือ (Book Review)

บทวิจารณ์หนังสือ ประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สังกัด (ภาควิชา คณะ สถาบัน) และอีเมลของผู้เขียน สำหรับติดต่อ ชื่อเรื่องของบทวิจารณ์หนังสือควรเรียกร้องความสนใจของผู้อ่านและสื่อความหมายได้ชัดเจน เช่น ตั้งชื่อตามชื่อหนังสือที่ต้องการวิจารณ์ ตั้งชื่อตามจุดมุ่งหมายของเรื่อง ตั้งชื่อด้วยการให้ประเด็น ขวนคิด ขวนสงสัย เป็นต้น ในส่วนบทนำ เป็นการเขียนนำเกี่ยวกับหนังสือที่จะวิจารณ์ ในส่วนเนื้อหา เป็นส่วนแสดงความคิดเห็นและรายละเอียด ในการวิจารณ์ โดยนำเสนอจุดเด่น และจุดบกพร่องของเรื่องอย่างมีหลักเกณฑ์และมีเหตุผล และส่วนสุดท้ายเป็นบทสรุป เป็นการเขียนสรุปความคิดทั้งหมดที่วิจารณ์และให้แง่คิด หรือข้อสังเกตที่เป็น ประโยชน์ต่อผู้อ่าน นอกจากนี้บทสรุปยังช่วยให้ผู้อ่านได้ทบทวน ประเด็นสำคัญของเรื่องและความคิดสำคัญของผู้วิจารณ์ แม้ว่าผู้อ่านอาจจะไม่ได้อ่านบทวิจารณ์ทั้งบท แต่ได้อ่านบทสรุปก็สามารถทราบเรื่องของหนังสือที่นำมาวิจารณ์ รวมทั้งความคิดเห็นของผู้วิจารณ์ที่มีต่อหนังสือเรื่องนั้นได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ขนาดของบทความ: ควรจัดพิมพ์บทความด้วย Microsoft Word บนกระดาษขนาด A4 หน้าเดียว ประมาณ 26 บรรทัด ต่อ 1 หน้า แบบแนวตั้ง (Portrait) รูปแบบตัวอักษร (Font) ให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร (Font size) เท่ากับ 16 และใส่เลขหน้าตั้งแต่ต้นจนจบบทความที่ด้านบนขวาของกระดาษ (ยกเว้นหน้าแรก) ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า สำหรับการตั้งค่าหน้ากระดาษ (Page setup) และส่วนระยะขอบ (Margins) กำหนดดังนี้

ด้านบน (Top)	2.54 ซม.	ด้านล่าง (Bottom)	2.54 ซม.
ด้านซ้าย (Left)	2.54 ซม.	ด้านขวา (Right)	2.54 ซม.
หัวกระดาษ (Header)	1.25 ซม.	ท้ายกระดาษ (Footer)	1.25 ซม.

2. ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน และสังกัด (Title, Author's name, Author's affiliation): ชื่อเรื่องภาษาไทยและภาษาอังกฤษจัดกึ่งกลาง ให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 18 ตัวหนา ส่วนชื่อ-นามสกุลผู้เขียน และสังกัด ให้เขียนทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งนี้ ชื่อผู้เขียนให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 16 ตัวหนา และไม่ต้องระบุค่านำหน้าชื่อ เช่น นาย นาง นางสาว ดร. ผศ. รศ. ศ. เป็นต้น ส่วนสังกัดให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 16 ตัวหนา ให้ระบุสาขาวิชา ภาควิชา คณะ สถาบัน หรือหน่วยงานที่สังกัด พร้อมอีเมลในการติดต่อ ทั้งนี้ กรณีมีผู้เขียนมากกว่า 1 คน ให้ระบุด้วยว่าใคร คือ ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

3. บทคัดย่อ (Abstract): หัวข้อบทคัดย่อให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 18 ตัวหนา และขีดซ้าย ส่วนเนื้อความในบทคัดย่อและคำสำคัญให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 16 ตัวธรรมดา หากเป็นบทความภาษาไทยให้เขียนบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ หากเป็นบทความภาษาอังกฤษให้เขียนบทคัดย่อเป็นภาษาอังกฤษ (หรืออาจมีบทคัดย่อภาษาไทยด้วยหรือไม่ก็ได้) ทั้งนี้ บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ รวมกันไม่ควรเกิน 1 หน้ากระดาษ A4 ให้จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ มีความยาวประมาณ 250 คำ จะต้องพิมพ์คำสำคัญในบทคัดย่อภาษาไทย และพิมพ์ Keywords ในบทคัดย่อภาษาอังกฤษของบทความเรื่องนั้นด้วยจำนวนไม่เกิน 5 คำ

4. เนื้อหา (Content): หัวข้อให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 18 ตัวหนาและขีดซ้าย ส่วนเนื้อความในแต่ละหัวข้อให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดของตัวอักษร 16 ตัวธรรมดา

5. รูปภาพและตารางประกอบ: ควรมีภาพที่ชัดเจน ถ้าเป็นรูปถ่ายควรมีภาพถ่ายจริงแนบมาด้วย หากเป็นภาพที่คัดลอกมาจากแหล่งอื่นควรเขียนแหล่งอ้างอิงนั้นด้วยตามหลักวิชาการ กรณีรูปภาพให้ใช้คำว่า “ภาพที่” กรณีตารางให้ใช้คำว่า “ตารางที่”

6. เอกสารอ้างอิง (References): การเขียนอ้างอิงให้ใช้ระบบ APA โดยมีเงื่อนไขดังนี้

6.1 เอกสารที่นำมาอ้างอิงต้องมีไม่เกิน 20 รายการ และไม่ควรมีอายุเกิน 10 ปี ยกเว้นแนวคิดหรือทฤษฎีที่เกิดขึ้นก่อน 10 ปีและในปัจจุบันยังมีส่วนนำมาใช้ อนุโลมให้นำมาใช้อ้างอิงได้

6.2 ให้จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ และเรียงตามลำดับตัวอักษร

6.3 ต้องมีการอ้างอิงบทความที่มีการตีพิมพ์ในวารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ อย่างน้อย 1 บทความ

6.4 การอ้างอิงในเนื้อหา ใช้ระบบนามปี [นามสกุล, ปี หรือ นามสกุล (ปี)] และอ้างอิงโดยใช้นามสกุลภาษาอังกฤษเท่านั้น เช่น Yurarach (2017) หรือ (Yurarach, 2017) เป็นต้น ทั้งนี้ หากมีผู้แต่ง 2 คน ให้ใส่นามสกุลทั้งสองคน เช่น Yurarach and Yoothanom (2017) หรือ (Yurarach and Yoothanom, 2017) หากมีผู้แต่งมากกว่า 2 คน ให้ใส่นามสกุลของผู้แต่งคนแรก และตามด้วย “et al.” เช่น Yurarach et al. (2017) หรือ (Yurarach et al., 2017) เป็นต้น

6.5 เอกสารอ้างอิงฉบับภาษาไทยต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษทั้งหมด โดยมีแนวทางดังนี้

(1) ต้องแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษทุกรายการ โดยยังคงเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเดิมไว้ด้วย เขียนจัดเรียงคู่กัน โดยให้เอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษที่แปลขึ้นก่อนและตามด้วยเอกสารอ้างอิงภาษาไทย และเติมคำว่า “(in Thai)” ต่อท้ายเอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษที่แปลจากภาษาไทย

(2) การเรียงลำดับเอกสารอ้างอิง กรณีเอกสารอ้างอิงที่แปลจากภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษให้เรียงลำดับตามตัวอักษรภาษาอังกฤษ และรายการเอกสารอ้างอิงทุกรายการ หากมีผู้เขียนไม่เกิน 6 คน ให้ใส่ชื่อให้ครบทุกคน แต่หากมีมากกว่า 6 คน ให้ใส่ชื่อทั้ง 6 คน หลังจากคนที่ 6 ให้ตามด้วย “และคณะ” หรือ “et al”

ตัวอย่างการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

ตัวอย่างที่ 1 หนังสือ

ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อหนังสือ. พิมพ์ครั้งที่ (ถ้ามี). สถานที่พิมพ์ (เมือง): สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.

Iamsiriwong, O. (2008). *Database Systems*. Bangkok: SE-Education. (in Thai)

โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. (2551). *ระบบฐานข้อมูล*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด ยูเคชั่น.

ตัวอย่างที่ 2 วารสาร

ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, ปีที่ (ฉบับที่), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

Jitsakul, W. and Sodsri, S. (2017). Text Classification Analysis by Stability Comparison of Algorithms. *Sripatum Review of Science and Technology*, 9, 19-31. (in Thai)

วัชรวิวัฒน์ จิตต์สกุล และสุนันทา สดสี. (2559). การวิเคราะห์การจำแนกข้อความด้วยการเปรียบเทียบความเสถียรของอัลกอริทึม. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 9, 19-31.

ตัวอย่างที่ 3 เว็บไซต์

ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง. [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ วัน เดือน ปี, จาก: URL.

Wikipedia free encyclopedia. (2018). *Globalization* [Online]. Retrieved May 23, 2018, from: <http://th.wikipedia.org/wiki/Globalization>. (in Thai)

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2561). *โลกาภิวัตน์* [ออนไลน์]. ค้นเมื่อ 23 พฤษภาคม 2561, จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/Globalization>.

ตัวอย่างที่ 4 รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการ (ชื่อเอกสาร), วัน เดือน ปี สถานที่จัด, หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

Chaksupa, T. and Bunditwattanawong, T. (2015). An Ontology for Quality Hands-on Examination Development in Information Technology. *The Proceedings of the 10th National Sripatum University Conference (SPUCON2015)*, 22 December 2015 at Sripatum University (Bangkhen Campus), 1581-1589. (in Thai)

ทนุงค์ จักขุพา และเทพฤทธิ์ บัณฑิตวัฒนวงศ์. (2558). “ออนโทโลยีปัจจัยคุณภาพสำหรับออกข้อสอบภาคปฏิบัติสาขาไอที.” รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 10 ประจำปี 2558, วันที่ 22 ธันวาคม 2558 ณ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 1581-1589.

ตัวอย่างที่ 5 วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับปริญญาของวิทยานิพนธ์, ชื่อมหาวิทยาลัย.

Chaksupa, T. (2015). *Ontology Development for Recommender System with Qualitative Factors for Hands-on Examination Selection in Information Technology*. Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy Program in Information Technology. Sripatum University. (in Thai)

ทनुวงศ์ จักขุพา. (2559). *การพัฒนาออนโทโลยีปัจจัยเชิงคุณภาพสำหรับระบบค้นหาเชิงความหมาย ในการออกข้อสอบภาคปฏิบัติสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ. มหาวิทยาลัยศรีปทุม.*

7. บทความทุกเรื่องที่ส่งให้กองบรรณาธิการพิจารณา ต้องไม่ได้รับการเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเผยแพร่ของวารสารอื่นๆ

8. การส่งต้นฉบับบทความ (Submission)

8.1 ส่งต้นฉบับบทความ (Manuscript) ที่จัดเตรียมตามคำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับและตามรูปแบบการอ้างอิงที่วารสารกำหนด (นามสกุล .docx และ .pdf) และส่งผ่านระบบ ThaiJo โดยให้ผู้เขียนเข้าไปลงทะเบียนและทำตามขั้นตอนของระบบ โดยสามารถเข้าไปดำเนินการได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/spurst>

8.2 กรณีที่บทความไม่ผ่านการพิจารณาเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ ผู้เขียนไม่จำเป็นต้องจ่ายค่าดำเนินการใดๆ แต่กรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเบื้องต้นแล้วเห็นว่า ควรส่งผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewers) จำนวน 3 ท่าน ตรวจสอบและประเมินคุณภาพของบทความ ผู้เขียนจะต้องจ่ายค่าดำเนินการ (Operation fee) ในอัตรา 6,000 บาท ต่อ 1 บทความ โดยใช้วิธีการโอนเงินเข้าบัญชีธนาคารและส่งสลิปเงินโอนมาที่กองบรรณาธิการวารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ผ่านช่องทางอีเมล spujournal@spu.ac.th หรือทางไปรษณีย์

(1) ชื่อบัญชีธนาคาร

ธนาคารกรุงเทพ สาขามหาวิทยาลัยศรีปทุม

ชื่อบัญชี มหาวิทยาลัยศรีปทุม ประเภทบัญชี ออมทรัพย์

เลขที่บัญชี 006-8-07686-8

(2) กองบรรณาธิการ วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่อยู่ ศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและการประกันคุณภาพการศึกษา มหาวิทยาลัยศรีปทุม

เลขที่ 2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-2579-1111 ต่อ 1331, 1336, 1155

นโยบายและเงื่อนไขในการพิจารณาบทความ (Editorial Policy)

1. บทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ต้องเป็นผลงานที่อยู่ในสาขาวิชาใดวิชาหนึ่งตามวัตถุประสงค์ของวารสาร ได้แก่ (1) General Computer Science (2) General Energy (3) General Engineering (4) Architecture และ (5) General Environmental Science

2. บทความที่ส่งมาต้องไม่เคยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ที่วารสารใดมาก่อนและต้องไม่อยู่ระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่น

3. บทความที่ส่งมาจะได้รับการประเมินคุณภาพเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการก่อน โดยจะพิจารณาถึงความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวารสาร โดยการพิจารณาแยกเป็น 2 กรณี คือ

3.1 ในกรณีที่บทความไม่ผ่านการพิจารณาเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ บรรณาธิการจะแจ้งปฏิเสธการรับตีพิมพ์บทความ (Reject) พร้อมเหตุผล ข้อเสนอแนะ หรือข้อสังเกตสั้นๆ ให้ผู้ส่งบทความได้รับทราบ ทั้งนี้ผู้เขียนไม่จำเป็นต้องจ่ายค่าดำเนินการใดๆ

3.2 ในกรณีที่บทความผ่านการพิจารณาเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ ผู้เขียนจะต้องจ่ายค่าดำเนินการ (Operation fee) ในอัตรา 6,000 บาท ต่อ 1 บทความ และบรรณาธิการจะส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewers) ในสาขาที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบคุณภาพของบทความก่อนลงตีพิมพ์ โดยผู้ประเมินไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ประเมินบทความ (Double-blind peer review) ทั้งนี้ การจ่ายเงินค่าดำเนินการให้จ่ายผ่านระบบการโอนเข้าบัญชีธนาคารเท่านั้น

4. เมื่อผู้ทรงคุณวุฒิได้พิจารณากลับกรองบทความเรียบร้อยแล้ว กองบรรณาธิการจะพิจารณาว่าบทความนั้นๆ ควรได้ลงตีพิมพ์ (Accept) หรือควรส่งคืนให้ผู้เขียนแก้ไขเพื่อพิจารณาอีกครั้งหนึ่ง (Major/Minor Revision) หรือควรแจ้งปฏิเสธการลงตีพิมพ์ (Reject)

5. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาและตัดสินใจตีพิมพ์บทความในวารสาร และจะไม่คืนเงินไม่ว่าในกรณีใดๆ

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณานำลงวารสารศรีปทุมปริทัศน์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เรียน บรรณาธิการ

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ตำแหน่ง.....อาจารย์ประจำสาขาวิชา/ภาควิชา.....

คณะ.....มหาวิทยาลัย.....

ขอส่ง () บทความวิจัย () บทความวิชาการ

() บทความหนังสือ () บทความปริทัศน์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย)

ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ)

คำสำคัญ (ภาษาไทย)

Keywords (ภาษาอังกฤษ)

ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทย)

ชื่อผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ)

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวกหมู่ที่.....ซอย.....

ถนน.....ตำบล/แขวง.....อำเภอ/เขต.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรศัพท์มือถือ.....โทรสาร.....E-mail.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้

() เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

() เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารอื่นๆ อีก นับจากวันที่ข้าพเจ้าได้ส่งบทความฉบับนี้มายังกองบรรณาธิการวารสารศรีปทุมปริทัศน์

ลงนาม

(.....)



NATIONAL AND
INTERNATIONAL
SRIPATUM
UNIVERSITY
CONFERENCE
2026

วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

SRIPATUM REVIEW OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 17 มกราคม – ธันวาคม 2568

บทความวิจัย

- 11** ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อขีดความสามารถความพร้อมในการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับกองทัพอากาศ : ประยูร ธรรมาธิวัฒน์, ประสงค์ ปราณิตพลกรัง และพายุพ ศิรินาม
- การศึกษาเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนโครงสร้างอาคารระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม้ และเหล็กรูปพรรณ: กรณีศึกษา บ้านดีดีรักฟ้า 4 ของกระทรวงพลังงาน : ภัทร์ แพนสมบุญ, ศุภรัชชัย วรรัตน์, สุรศักดิ์ จันทาย, ประยุทธ์ ฤทธิเดชและณัฐ นาคกร
- 46** การแบ่งส่วนหัวใจห้องบนซ้ายจากภาพ MRI สามมิติแบบกึ่งมีฟูลอนด้วยเทคนิคคล้ายที่ปรับตามความเชื่อมั่น : พิรสรณ์ รพินต์รางบาง และธนาสัย สุนทรพันธุ์
- 62** การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือในการพัฒนาแบบจำลองการประเมิน AUN-QA : วณิดา ปานนพทา และปราณี มณีรัตน์
- 82** นวัตกรรมการเรียนรู้เชิงปฏิบัติเพื่อการวิเคราะห์ผลกระทบของมุมเอียงต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด : พรหมพิตร บุณรักษา, อนุสรณ์ พ้องประภา, สมมาตร ทองคำ, มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม อนุวัท ลิมาวงษ์ปราณี, อนุวัธ ลิมาวงษ์ปราณี และธีระพงษ์ บุณรักษา
- 98** การพยากรณ์ความเร็วลมด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก และปัญญาประดิษฐ์แบบอธิบายได้ : กรณีศึกษา จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย : เกศรา พลไชย, ธีระพงษ์ บุณรักษา, พรหมพิตร บุณรักษา

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/spurst>

ISSN 2985 - 1734



NATIONAL AND
INTERNATIONAL
SRIPATUM
UNIVERSITY
CONFERENCE
2026