



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาอวกาศ

NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 ก.ค. - ธ.ค. 68

NKRAFA

AIR POWER BEGINS HERE

ISSN 3057 - 0905 (Print)

ISSN 3057 - 0913 (Online)

- ชื่อวารสาร:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
- ISSN:** 3057-0905 (Print)
3057-0913 (Online)
- เจ้าของ:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
999 หมู่ 5 ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2224 ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก สระบุรี 18180
เว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct>
อีเมล nkrafa.scijournal@gmail.com
- วัตถุประสงค์:** 1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อส่งเสริมด้านการค้นคว้าด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- ขอบเขต:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ รับผิดชอบบทความวิชาการและบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี การบินและป้องกันประเทศหรือศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง โดยมีกลุ่มเป้าหมาย คือ คณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย ทั้งภายใน และภายนอกสถาบัน
- กำหนดออก:** ปีละ 2 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน
ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม
- จัดพิมพ์โดย:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ทุกบทความได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewers) กลั่นกรองบทความทั้งหมด 3 ท่าน ด้วยวิธีการที่ไม่ทราบชื่อกันและกัน (Double Blind Review) ก่อนตีพิมพ์และเผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ทางวารสารไม่มีนโยบายในการเก็บค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์ทุกขั้นตอน กองบรรณาธิการไม่สงวนสิทธิ์ในการคัดลอกบทความเพื่อการศึกษาแต่ให้อ้างอิงบทความให้ครบถ้วน

ที่ปรึกษา: พล.อ.ท. ปิยะกิตติ์ สุทธิวัฒน์ธนากุล
พล.อ.ต. รศ.สมเกียรติ์ สุกางโอง
พล.อ.ต. ศ.ธนากร พิระพันธ์
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำซ่าง
อ.ชาตรี วงษ์แก้ว

บรรณาธิการ: น.อ. รศ.ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง

รองบรรณาธิการ: ร.อ. ผศ.ภูมินันท์ บัวงาม

กองบรรณาธิการ:

ร.อ. รศ.ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ผศ.ดร.ธนธร ชื่นยินดี	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ผศ.ดร.ธงจุฬา สุวรรณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ศิริวิมล สายเวช	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.เกวลี สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
ดร.ปวีตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
รศ.ดร.สันติ เชื้อเตอะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พยุ่ง มีสัจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เจริญชัย โขมพัฒนารณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฐพล บุญนำ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัตนศักดิ์ เหมะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภคินี ชิตสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.สมโภชน์ วงษ์เอียด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ณัฐวุฒิ ผ่องหนู	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี
ผศ.ดร.กมลภัสสร มั่นศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
รศ.ดร.พงศกร สุนทรายุทธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วงศ์วิศรุต เชื้อองสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุตาภรณ์ ภู่อแพร่	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ปิยดา โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.กรรณิการ์ อ่อนสำลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.พัชรินทร์ บัวเย็น	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผศ.ดร.รสนิน เพตะกร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รศ.ดร.คมเดช ภาพพัฒนบุรี
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ชูประดิษฐ์
ผศ.ดร.อดิสร แก้วภักดี
อ.กวินทร์ จิวสุวรรณ
อ.สาวตรี พิบูลศิลป์
ดร.ภูวสิทธิ์ ตุ่นแก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

กองจัดการวารสาร

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

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ตรวจทานภาษาของบทความ

อ.ธีระพงศ์ คงด้วง
ร.ท. ณัฐวุฒิ นาคแก้ว

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

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

รศ.ดร.กสิณ รังสิกรรพม
ผศ.ดร.ธารชуда พันธนิกุล
ผศ.ดร.ขวัญชัย หนาแน่น
อ.จุฑาพร เกษร
ผศ.ดร.สุคนิรันดร์ เพชรรัตน์
ผศ.ดร.ณัฐรัตน์ ปาณานนท์
ผศ.สิรินธร จิยาศักดิ์
ผศ.ดร.นิกร กรรณิกากลาง
ผศ.ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์
อ.หทัย แก้วกรณ
ดร.สุรียา จิรสติสิน
ผศ.ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส
รศ.ดร.สุระสิทธิ์ ทรงม้า

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

บทบรรณาธิการ

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

วารสารฉบับนี้มีบทความที่ผ่านการพิจารณาจำนวนทั้งสิ้น 13 เรื่อง ประกอบด้วย บทความจากหน่วยงานภายนอก จำนวน 10 เรื่อง และบทความภายในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จำนวน 3 เรื่อง ทั้งนี้ กองบรรณาธิการขอเรียนเชิญอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิตนักศึกษา ส่งผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพ ปฏิบัติตามจรรยาบรรณการวิจัย เพื่อร่วมขับเคลื่อนองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในฉบับถัดไป

นาวาอากาศเอก



(รองศาสตราจารย์ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง)

บรรณาธิการ

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดในการแปลงเสียง	135-157
The Application of Generative Artificial Intelligence Technology in Voice Conversion	
อานนท์ บางเสน, พายัพ ศิรินาม	
Anon Bangsan, Payap Sirinam	
การศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบ	158-178
A Comparative Study of Thailand's Eastern Aerotropolis and the Aerotropolis Model	
เพ็ญสิริ เล่าสู่อังกูร, นปภา ภัทรกมลพงษ์, คงศักดิ์ ชมชุม	
Pensiri Laosu-angkoon, Napapa Patarakamonpong, Kongsak Chomchum	
การปรับปรุงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ห่อหุ้มเพื่อเสริมศักยภาพอย่างยั่งยืนของ	179-193
วิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย อำเภอลำลูกเกด จังหวัดจันทบุรี	
Improving the Production Process of Curry Puff Products to Enhance the Sustainable Potential of Mae Baan Tapon Noi Community Enterprise, Khlung District, Chanthaburi Province	
ปรัชภรณ์ เศรษฐเสถียร, เบญจมาศ เนติวรรักษา, กฤติยาภรณ์ คุณสุข, พงศธร จันทร์ตรี	
Pratchaporn Setsathien, Benjamas Netiworaruksa, Kritiyaporn Kunsook, Pongsaton Chantri	
Assessing Vegetation Change from 2005 to 2024 Using Remote Sensing and Geographic Information Systems: A Case Study of the Phung River Basin, Sakon Nakhon Province	194-218
Narathip Ruksajai, Phayom Saraphirom, Worapong Lohpaisankrit	
การลดต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี	219-241
Reducing Life Cycle Costs of Bucket Elevator in Fertilizer Production Plant	
มีน อังคุโชติ, สมหญิง งามพรประเสริฐ	
Meen Angsuchoti, Somying Ngarnpornprasert	

บทความวิจัย

ตัวแบบสถิติเพื่อพยากรณ์คุณภาพอากาศ: กรณีศึกษาค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในจังหวัดเชียงใหม่	242-258
--	---------

Statistical Model for Air Quality Forecasting: A Case Study of Dust Particles
No Larger Than 2.5 Microns (PM2.5) in Chiang Mai Province

กฤติชัย โรจนนะ, รัชนีวรรณ วงศ์พระจันทร์

Kittichai Rochana, Ratchaneewan Wongprachan

การทดสอบและศึกษาสมรรถนะใบพัดขณะบินลอยตัวภายใต้สภาวะที่ได้รับผลกระทบจากพื้น	259-273
--	---------

Experimental Study of Hovering Rotor Performance with Ground Effect

เอกพล ใบโพธิ์, จิรวุฒิ คล่องตรวจโรค

Aekkapol Baipho, Jiravud Klongtrujrok

ระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง	274-287
--	---------

Fire Incident Detection System for Housing Estates using IoT and Cloud
Computing Technology

ยุทธจักร อินทร์คง, ธงรบ อักษร, พงษ์พิณช์ เลิศเจริญวุฒา, กิตติพงษ์ สุวรรณราช, ภาวินี อินทร์ทอง

Yuttachak Inkhong, Thongrob Auxsorn, Phongphit Lertjareonwuttha, Kittipong

Suwannaraj, Pavinee Inthong

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบอาคารขนาดเล็กรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานเพื่อใช้ในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มวกเหล็ก	288-303
--	---------

Development of Mathematical Models to Analyze the Impact of Geometric Small-Scale
Building Designs on Energy Efficiency: A Case Study at Navaminda Kasatriyadhiraj
Royal Air Force Academy, Muak Lek

สิริญญา ถนอมพลกรัง, สมภูมิ มีชานา, วิศรุต คล้ายแจ้, ศิริกุล ศิริธีระกุล

Sirunya Thanompolkrang, Sompoom Meechowana, Witsarut Kraychang, Sirikul

Siriteerakul

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทความวิจัย

LSTM-Based Approach for Predictive Link Monitoring and RRU Anomaly Detection in 4G/5G Networks	304-319
--	---------

Pannatorn Kijphitayarit, Settawit Poochaya

การประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือก เพื่อลดหมอกควันในจังหวัดเชียงใหม่	320-334
--	---------

Assessment of the Potential of Forage Maize Residues as an Alternative Biomass Fuel for Mitigating Haze Pollution in Chiang Mai	
---	--

จินดามณี ปोकสอน

Chindamanee Pokson

Design and Simulation of a Guidance Control System for a 2.75-inch Rocket Using Pole Placement and PI Control	335-355
---	---------

Nathawat Chaikam, Prasatporn Wongkamchang, Prayoon Kunyoo

บทความวิชาการ

การเพิ่มความมั่นคงของข้อมูลและการสื่อสารด้วยเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ	356-369
Enhancing Data and Communication Security with Key Recovery Technology	

จำรูญ จันทร์กฤษณ์, กนกวรรณ กันยะมี

Jumroon Chankulchorn, Kanokwan Kanyamee

คำแนะนำสำหรับผู้แต่งในการส่งบทความ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดในการแปลงเสียง
The Application of Generative Artificial Intelligence Technology
in Voice Conversion

อานนท์ บางเสน^{1*} และ พายัพ ศิรินาม²

¹สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

²ภาควิชาคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Anon Bangsan^{1*} and Payap Sirinam²

¹The Graduate School of Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Department of Computer Science,

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

anon_b@rtaf.mi.th

Received 03 January 2025

Revised 07 April 2025

Accepted 17 April 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ที่มีความเหมาะสมในการแปลงเสียงบุคคล 2) เพื่อพัฒนาแบบจำลองการแปลงเสียงด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด และศึกษาแนวทางการปรับแต่งแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานบนมิติไซเบอร์ 3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและศักยภาพในการถอดเสียงโดยใช้เสียงแปลงที่สร้างจากแบบจำลอง 4) เพื่อนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดในการปฏิบัติการทางไซเบอร์เชิงรุก

ผลการศึกษาพบว่า MaskCycleGAN-VC เป็นแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดที่มีประสิทธิภาพสูง และเหมาะสมสำหรับการแปลงเสียงภาษาไทย แบบจำลองนี้สามารถสร้างเสียงแปลงที่มีความใกล้เคียงกับต้นฉบับได้อย่างเป็นธรรมชาติ ทั้งในด้านจังหวะการเว้นวรรค น้ำหนักเสียงและการถ่ายทอดอารมณ์ จุดเด่นสำคัญคือใช้เวลาเพียง 1 วันในการฝึกฝนแบบจำลองด้วยทรัพยากรคอมพิวเตอร์ระดับปานกลาง เสียงแปลงสามารถถอดเสียงผู้ฟังได้ 56% ขณะที่เสียงจริงถูกเข้าใจผิดว่าเป็นเสียงแปลงสูงสุด 59% สะท้อนถึงความท้าทายในการแยกแยะเสียงในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวน โดยมีตัวชี้วัดดังนี้ 1) ค่าคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Mean Opinion Score: MOS) ความเป็นธรรมชาติสูงสุด 3.9 และความคล้ายคลึงสูงสุด 4.2 2) ค่าความผิดเพี้ยนของเมลเซปสตรัม (Mel Cepstral Distortion: MCD) ต่ำสุด 5 dB 3) ค่าระยะห่างเสียงเชิงลึกแบบเคอร์เนล (Kernel Deep Speech Distance: KDSD) ต่ำสุด 15.9 mKDSD แบบจำลองนี้มีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านความมั่นคงและการปฏิบัติการทางไซเบอร์เชิงรุก อย่างไรก็ตามการใช้งานควรดำเนินการอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันการนำไปใช้ในทางที่ไม่เหมาะสม

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด, โครงข่ายปฏิภักษ์เชิงกำเนิด, การแปลงเสียง, สงครามไซเบอร์

Abstract

This research aims to 1) explore the appropriate application of artificial intelligence (AI) technology for voice spoofing, 2) develop a generative AI-based voice spoofing model and investigate optimization strategies to enhance its suitability for cyber domain applications, 3) evaluate the performance and deception potential of synthetic voices generated by the model, and 4) propose practical applications of generative AI technology in offensive cyber operations.

The findings indicated that MaskCycleGAN-VC was a highly effective generative artificial intelligence model suitable for voice spoofing in the Thai language. This model could generate synthetic voices that closely resembled the original in terms of naturalness, including rhythm, intonation, and emotional expression. A key feature of the model was its ability to be developed and trained within just one day, using only moderate computational resources. The synthetic voices generated by the model could deceive listeners into believing they were genuine voices with an accuracy of up to 56%, while genuine voices were misclassified as synthetic in up to 59% of cases. This highlighted the challenges of distinguishing between genuine and synthetic voices in noisy environments. Performance metrics included a Mean Opinion Score (MOS) score for naturalness of up to 3.9 and similarity of up to 4.2, with a minimum Mel Cepstral Distortion (MCD) of 5 dB and Kernel Deep Speech Distance (KDSD) of 15.9 mKDSD. This model demonstrated significant potential for applications in security and offensive cyber operations, including support for intelligence activities, confusion in emergency scenarios, and simulated training exercises. However, its usage should be approached with caution to prevent misuse in unethical contexts.

Keywords: Generative Artificial Intelligence, Generative Adversarial Network, Voice Conversion, Cyber Warfare

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลที่ทุกอย่างสามารถเข้าถึงได้ง่ายเพียงแค่มีอินเทอร์เน็ต นำมาซึ่งภัยคุกคามทางไซเบอร์หลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจและสังคมรวมทั้งต่อบุคคลและองค์กรตามการพัฒนาของเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาแนวโน้มด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ ในปี 2024 ซึ่งจัดอันดับโดย Gartner [1] พบว่า หนึ่งในเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและน่าจับตามองที่สุดคือ ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด โดยมีความสามารถสร้างสรรค์ผลงานที่มีความเหมือนจริงออกมาได้หลากหลาย [2] ทั้งข้อความ ภาพ เสียง และวิดีโอ บริษัท Gogolook ผู้พัฒนาแอปพลิเคชัน Whoscall ได้ออกมาเตือนถึงภัยคุกคามจากการหลอกลวงด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ [3] โดยเฉพาะการปลอมแปลงเสียงที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน มีจาชีพนาเทคโนโลยีนี้ มาสร้างเสียงเลียนแบบบุคคลใกล้ชิด เช่น สมาชิกครอบครัวหรือเพื่อนสนิท เพื่อหลอกลวงเหยื่อให้โอนเงินหรือให้ข้อมูลส่วนตัวที่สำคัญ กระทั่งดิจิทัลเพื่อ

เศรษฐกิจและสังคมและสำนักงานตำรวจแห่งชาติ [4] ได้ออกมาเตือนประชาชนให้ระมัดระวังต่อภัยลักษณะนี้ โดยแนะนำให้ตรวจสอบตัวตนของผู้โทรทุกครั้งก่อนทำธุรกรรมหรือให้ข้อมูลส่วนตัว Gogolook ยังเน้นย้ำถึงความสำคัญของการไม่ไว้วางใจสายโทรเข้าที่ไม่คุ้นเคยและแนะนำให้ใช้เครื่องมือป้องกัน เช่น Whoscall ในการกรองและตรวจสอบเบอร์โทรที่อาจเป็นมิจฉาชีพ เพื่อป้องกันการตกเป็นเหยื่อของการโจมตีทางไซเบอร์ที่พัฒนาซับซ้อนมากขึ้นในยุคดิจิทัลปัจจุบัน

ด้วยเหตุนี้ตามแผนพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [5] ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ [6] และนโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศ [7] มีความสอดคล้องภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ [8] ในประเด็นด้านความมั่นคง เสริมสร้างศักยภาพและความพร้อมในทุกด้าน ทั้งคน เครื่องมือ ยุทธโศภกรรม เทคโนโลยีข้อมูลขนาดใหญ่ และการแก้ไขปัญหาสำคัญ อาทิ ภัยคุกคามทางไซเบอร์ รวมถึงยุทธศาสตร์ชาติในประเด็นด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขัน โดยให้การสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวิทยาศาสตร์ข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์กับการปฏิบัติการกิจบนมิติไซเบอร์ทั้งเชิงรุกและเชิงรับ [9] และเพื่อให้กองทัพอากาศสามารถปฏิบัติการหลักด้านความมั่นคงได้อย่างสมบูรณ์และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อประเทศ จึงจำเป็นต้องพัฒนาขีดความสามารถและเตรียมพร้อมรับมือกับภัยคุกคามรูปแบบใหม่ที่จะเกิดขึ้นได้ซึ่งเป็นทั้งความท้าทายและโอกาสอันดีในการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

อย่างไรก็ตามปัจจุบันงานวิจัยในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับเทคโนโลยีการแปลงเสียงที่มีความทันสมัย เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการปฏิบัติการทางไซเบอร์เชิงรุก งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดในการแปลงเสียง [10-14] คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงเสียงผู้พูด ให้เป็นเสียงของอีกคนที่มีเสียงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะบุคคล โดยยังคงรักษาเนื้อหาทางภาษา จังหวะ และน้ำเสียงของผู้พูดดั้งเดิมไว้ นอกจากนี้การประเมินคุณภาพเสียงที่แปลงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองให้มีความแม่นยำและใกล้เคียงเสียงต้นฉบับที่สุด งานวิจัยนี้ใช้ Kernel Deep Speech Distance (KDSD) เป็นตัววัดความคล้ายคลึงเชิงลึก โดยอาศัยพีเจอร์จากแบบจำลองรู้จำเสียงพูดที่เหมาะสมกับภาษาไทย เช่น Facebook AI's wav2vec 2.0 ซึ่งผ่านการฝึกด้วยข้อมูลเสียงขนาดใหญ่และสามารถดึงคุณลักษณะเชิงลึกได้อย่างแม่นยำ

2. ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาแบบจำลองที่พัฒนาจากเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดที่ได้รับการเผยแพร่ผ่านข้อมูลวิจัยเท่านั้น
2. เสียงที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสียงของบุคคลที่ให้ความยินยอมในการบันทึกเสียงเท่านั้น
3. การพัฒนาแบบจำลองอยู่บนข้อจำกัดของอุปกรณ์การประมวลผลและทรัพยากรการวิจัยที่มีอยู่

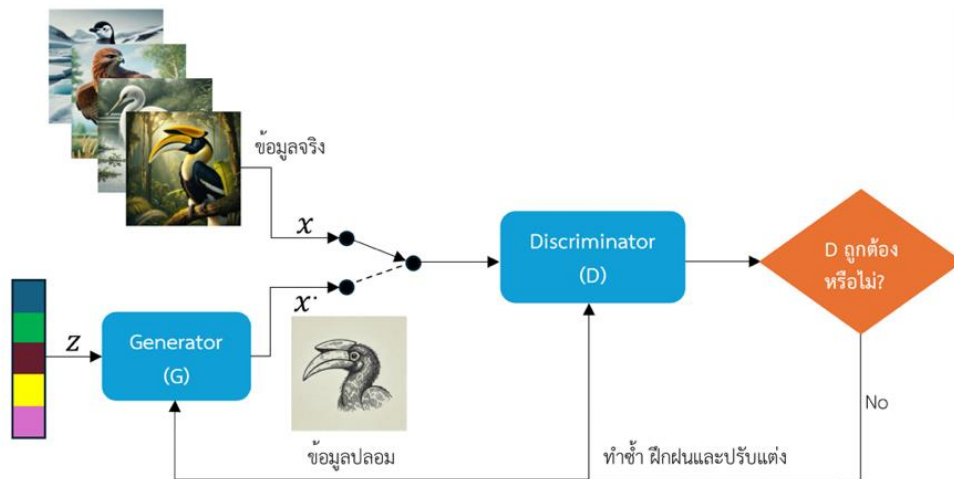
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด (Generative AI: GenAI)

ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดจัดเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในปัจจุบันที่มาแรงและล้าหน้าที่สุด [2] ถูกพัฒนาความสามารถจากการเรียนรู้เชิงลึกให้ชาญฉลาดและมีความอัจฉริยะมากยิ่งขึ้น เปรียบเสมือนสมองซีกขวา โดยเน้นจินตนาการ ความคิดสร้างสรรค์ สร้างข้อมูลใหม่แบบอัตโนมัติที่มีความเหมือนจริงคล้ายกับข้อมูลจริงที่มีอยู่ เช่น ภาพ เสียง วิดีโอ ข้อความ ถือเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบกลับหลังซึ่งต่างจากการเรียนรู้เชิงลึกแบบเดิมที่เน้นการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นหลัก โดยมีหลักการเริ่มต้นจากการระบุสิ่งที่ต้องการและแบบจำลองจะสร้างผลลัพธ์มาให้หลากหลายรูปแบบ

3.2 โครงข่ายปฏิบัติ์เชิงกำเนิด (Generative Adversarial Network: GAN)

โครงข่ายปฏิบัติ์เชิงกำเนิดหรือแบบจำลองแกนเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบันด้านปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด [2, 15-16] จัดเป็นประเภทการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน อัลกอริทึมประกอบด้วยสองโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำงานช่วยเหลือกันด้วยการแข่งขันลองสร้างและจับผิด ดังรูปที่ 1 ได้แก่ โครงข่ายผู้สร้าง (Generator) ทำหน้าที่วิเคราะห์ เรียนรู้ สกัดคุณลักษณะของสิ่งที่ต้องการสร้าง เช่น รูปร่าง ลายเส้น การตัดกันของสี เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เริ่มต้นมักจะใช้จากข้อมูลสุ่ม โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างข้อมูลใหม่ที่เหมือนจริงใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด ความโดดเด่นของโครงข่ายผู้สร้าง คือ ได้ผลลัพธ์ที่หลากหลายรูปแบบ ในขณะเดียวกันโครงข่ายผู้แยกแยะ (Discriminator) ทำหน้าที่วิเคราะห์ ฝึกฝน เรียนรู้ สกัดคุณลักษณะจากข้อมูลจริงและข้อมูลปลอมที่ถูกสร้างขึ้นจากโครงข่ายผู้สร้าง โดยมีเป้าหมายเพื่อให้สามารถแยกแยะข้อมูลทั้งสองได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งคอยช่วยเหลือ ปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายผู้สร้างให้ดีขึ้น โดยใช้ผลการประเมินที่ได้รับจากโครงข่ายผู้แยกแยะในการตรวจสอบแต่ละครั้ง กระบวนการนี้จะทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าโครงข่ายผู้สร้างจะสร้างข้อมูลใหม่ที่เหมือนจริงใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด และโครงข่ายผู้แยกแยะไม่สามารถแยกแยะได้ว่าข้อมูลนั้นเป็นของจริงหรือของปลอม



รูปที่ 1 โครงข่ายปฏิบัติ์เชิงกำเนิด

3.3 การแปลงข้อความเป็นเสียง (Text-to-Speech: TTS)

การแปลงข้อความเป็นเสียงเป็นเทคนิคการสร้างเสียงสังเคราะห์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เปรียบเสมือนผู้ช่วยเสียง เช่น Google Assistant และ Siri ช่วยอำนวยความสะดวกในการอ่านออกเสียงแบบอัตโนมัติจากข้อความ [17] เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และมีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ช่วยให้ผู้ใช้เข้าถึงข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลได้ง่ายขึ้น สนับสนุนการพัฒนาทักษะการฟังและการพูดของนักเรียนและนักศึกษา รวมถึงเพิ่มความสะดวกในการฟังข้อความระหว่างทำกิจกรรมอื่น เช่น ขับรถ ออกกำลังกาย หรือเล่นเกม นอกจากนี้ยังช่วยเครื่องคอมพิวเตอร์ปิดตัวตนด้วยเสียง AI เพื่อสร้างความปลอดภัยบนโลกออนไลน์ พร้อมพากย์เสียงและสร้างเนื้อหาได้อย่างรวดเร็วและน่าสนใจสำหรับเผยแพร่บนแพลตฟอร์มต่าง ๆ เช่น YouTube, Facebook, Instagram และ TikTok

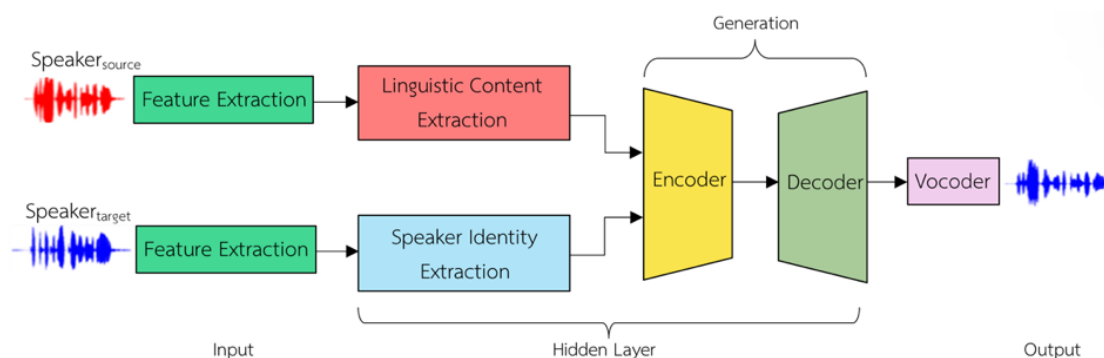
ผลการศึกษาและทดสอบการแปลงข้อความเป็นเสียงด้วยแบบจำลอง Voice Clone และ Fast Speech 2 พบว่าไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในภาษาไทย ด้วยข้อจำกัดในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้สำหรับฝึกฝนแบบจำลอง เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีชุดข้อมูลเสียงภาษาไทยแบบคู่ขนานและเป็นมาตรฐานที่พร้อมใช้งาน ได้แก่ ไฟล์เสียงและ

ไฟล์ข้อความ ผู้วิจัยจึงต้องรวบรวมชุดข้อมูลเสียงเองทั้งหมดซึ่งใช้เวลานาน และได้ชุดข้อมูลจำนวนน้อย ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของแบบจำลอง ทำให้คุณภาพเสียงที่ได้มีความไม่เป็นธรรมชาติ [16]

3.4 การแปลงเสียง (Voice Conversion: VC)

การแปลงเสียง [10-14] คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงเสียงผู้พูด (Source) ให้เป็นเสียงผู้พูดของอีกคน (Target) ที่มีเสียงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะบุคคล โดยยังคงรักษา เนื้อหาทางภาษา จังหวะ และน้ำเสียงของผู้พูดดั้งเดิมไว้ การทำงานพื้นฐานในการแปลงเสียง ดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วนดังนี้

- Feature Extraction แปลงสัญญาณเสียง (Sound Wave) ให้อยู่ในรูปแบบ Mel-frequency Cepstrum Coefficients (MFCC) [11, 12] หรือ Mel-Spectrogram [13-14, 18]
- Linguistic Content Extraction สกัดคุณลักษณะเนื้อหาทางภาษาและสไตล์การพูด เช่น ข้อความหรือประโยค ตลอดจนจังหวะและน้ำเสียง
- Speaker Identity Extraction สกัดคุณลักษณะเอกลักษณ์เสียงบุคคล ซึ่งในทางฟิสิกส์เรียกว่า คุณภาพของเสียง (Timbre) [19] หมายถึงคุณสมบัติที่ช่วยให้แยกแยะเสียงจากแหล่งกำเนิดต่างๆได้ แม้จะมีระดับเสียงและความถี่เท่ากัน แหล่งกำเนิดเสียงเมื่อสั่นจะสร้างความถี่หลายค่าออกมาพร้อมกัน เรียกว่า ฮาร์โมนิก (Harmonics) ซึ่งประกอบด้วยความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency: F0) และความถี่อื่นที่เป็นทวีคูณของความถี่พื้นฐาน เสียงที่เราได้ยินเกิดจากการรวมกันของฮาร์โมนิกหลายค่า โดยฮาร์โมนิกและแอมพลิจูดที่แตกต่างกันในแต่ละแหล่งกำเนิดเสียง ส่งผลให้เสียงมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว คุณลักษณะนี้จึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และสกัดเอกลักษณ์เสียงพูดของมนุษย์
- Generation รวมข้อมูลที่สกัดและประมวลผลเพื่อสร้างเสียงที่ปรับแต่ง โดยผลลัพธ์คือ สเปกโตรแกรมของเสียงพูดที่ผ่านการแปลงแล้ว
- Vocoder แปลงสเปกโตรแกรมของเสียงพูดให้เป็นสัญญาณเสียง



รูปที่ 2 การทำงานพื้นฐานในการแปลงเสียง

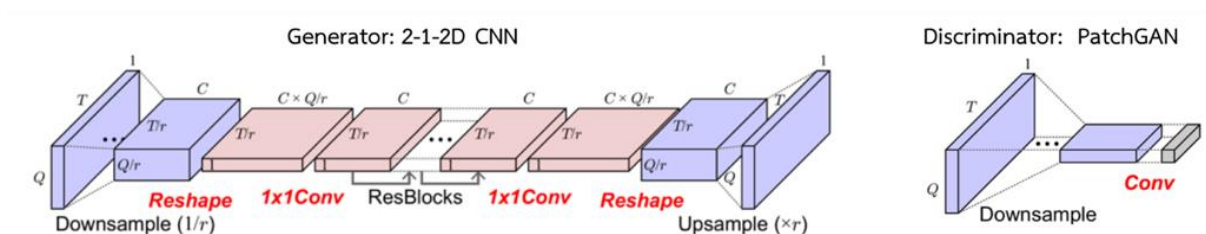
3.5 การแปลงเสียงด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบแกนสำหรับการใช้งานในภาษาไทย

ผู้วิจัย [16] ได้ศึกษาและทดสอบแบบจำลอง StarGAN-VC โดยมุ่งเน้นการแปลงเสียงจากกลุ่มบุคคลทั่วไปไปยังกลุ่มบุคคลเป้าหมาย (Many-to-Many Voice Conversion) ซึ่งช่วยให้สามารถแปลงเสียงในกลุ่มเป้าหมายได้จำนวนมากในคราวเดียว โดยไม่ถูกจำกัดให้ใช้เฉพาะบุคคลใดบุคคลหนึ่งเหมือนแบบจำลอง CycleGAN-VC ที่เป็นรูปแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (One-to-One Voice Conversion) การประเมินคุณภาพเสียงของทั้งสองแบบจำลองโดยใช้คะแนนเฉลี่ยความคิดเห็น (Mean Opinion Score: MOS) [20] ซึ่งเป็นมาตรวัดเชิงคุณภาพตามมาตรฐานสากล พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อประเมินประสิทธิภาพในการหลอกผู้ฟังพบว่าเสียงปลอมของบุคคลเป้าหมายสามารถหลอกหลวงผู้ฟังได้ในอัตราร้อยละ 20-40 ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการแปลงเสียงบุคคลให้เป็นเสียงบุคคล

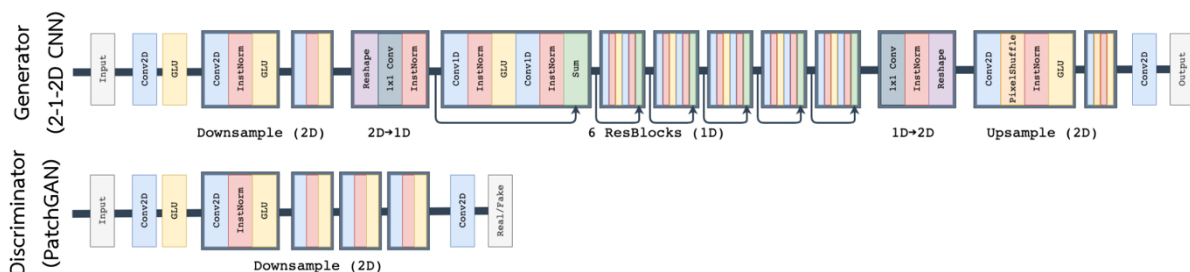
เป้าหมายมีศักยภาพเหมาะสมสำหรับปฏิบัติการไซเบอร์ในแง่การสร้างข่าวปลอมเพื่อหลอกลวงและสร้างความเข้าใจผิดว่าเสียงที่ได้ยินเป็นเสียงของบุคคลนั้นจริง หากนำเทคโนโลยีไปใช้ในเชิงลบ อาจกลายเป็นภัยคุกคามทางไซเบอร์ เช่น การทำวิศวกรรมทางสังคมเพื่อการล่อลวง ทุจริตด้านการเงิน และเผยแพร่ข่าวสารเท็จที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศและประชาชน

3.6 MaskCycleGAN-VC

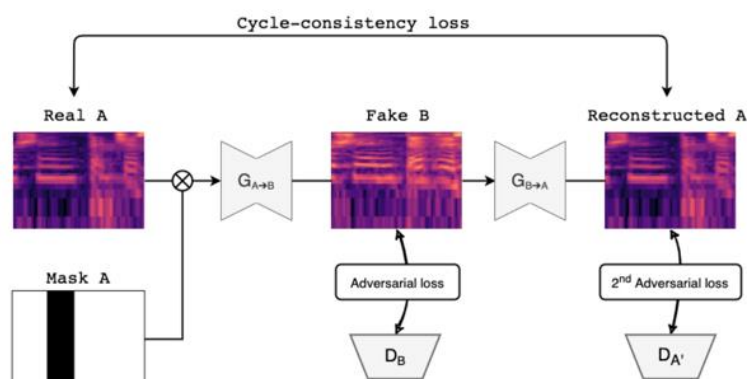
MaskCycleGAN-VC เป็นแบบจำลองแปลงเสียงรูปแบบหนึ่งต่อหนึ่ง [14] ที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีมาตรฐานในปัจจุบัน (Current Benchmark Method) [21] สถาปัตยกรรมประกอบด้วย Generator และ Discriminator ดังรูปที่ 3 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ดังรูปที่ 4 ข้อมูลนำเข้าอยู่ในรูปแบบ Mel-Spectrogram ซึ่งแสดงการกระจายพลังงานของเสียงในแกนเวลาและความถี่ที่สอดคล้องกับการได้ยินของมนุษย์ แบบจำลองนี้มีความโดดเด่นในการวิเคราะห์และเรียนรู้คุณลักษณะเสียงสามารถสร้างเสียงปลอมได้เหมือนจริงด้วยเทคนิคสภาพโครงสร้างฮาร์โมนิกหลังการแปลงเสียง โดยใช้วิธีเติมเต็มเฟรม (Filling in Frame) ที่ฝึกให้เรียนรู้เฟรมข้อมูลที่เสียหายและเติมเต็มแบบอัตโนมัติผ่านหน้ากาก (Mask) ดังรูปที่ 5 วิธีการนี้พัฒนาต่อยอดจาก CycleGAN-VC3 [13] ดังรูปที่ 6 และได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



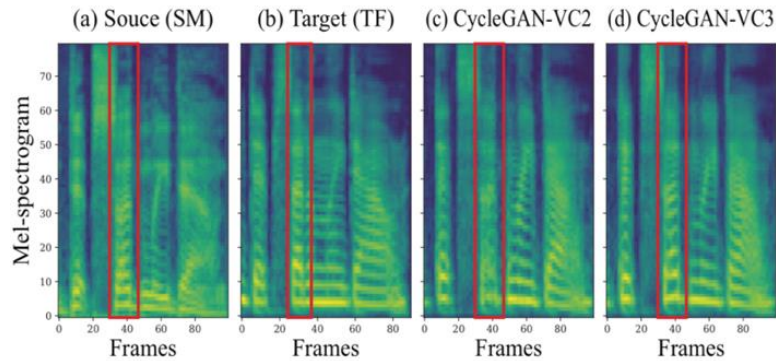
รูปที่ 3 สถาปัตยกรรม MaskCycleGAN-VC ประกอบด้วย Generator และ Discriminator [14]



รูปที่ 4 สถาปัตยกรรมภายใน Generator และ Discriminator [14]



รูปที่ 5 การฝึกฝนแบบจำลอง [14]



รูปที่ 6 เทคนิคการคงสภาพของโครงสร้างฮาร์โมนิก [13]

3.7 การประเมินประสิทธิภาพของเสียงที่สร้างจากแบบจำลอง MaskCycleGAN-VC

3.7.1 Mean Opinion Score (MOS)

MOS เป็นตัวชี้วัดการประเมินเชิงคุณภาพที่ใช้วัดคุณภาพเสียงในระดับคะแนน 1-5 [20] โดยผู้ประเมินพิจารณาจากความเป็นธรรมชาติ (Naturalness) ซึ่งสะท้อนถึงความสมจริงและลักษณะเสียงที่ฟังดูเหมือนมนุษย์ และความคล้ายคลึง (Similarity) ซึ่งแสดงถึงความใกล้เคียงระหว่างเสียงที่แปลงกับเสียงต้นฉบับ ค่า MOS ที่สูงบ่งชี้ว่าเสียงที่แปลงมีคุณภาพดีและสมจริง

3.7.2 Mel Cepstral Distortion (MCD)

MCD เป็นตัวชี้วัดการประเมินเชิงปริมาณที่ใช้วัดความแตกต่างเชิงพลังงานระหว่างเสียงที่แปลง (Converted speech) กับเสียงต้นฉบับ (Original speech) [22] งานวิจัยนี้ใช้ WORLD Analyzer [23] ในการสกัดสเปกตรัมของเสียงและแปลงเป็น Mel-Cepstral Coefficients (MCC) ที่ความละเอียด 35 มิติ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณค่า MCD ตามสมการที่ 1 [24] ค่าที่ต่ำบ่งชี้ว่าเสียงที่แปลงมีความใกล้เคียงกับเสียงต้นฉบับ ตัวชี้วัด MCD ยังสัมพันธ์กับการรับรู้ของมนุษย์ในด้านความสมจริงและความคล้ายคลึง โดยแสดงค่าในหน่วย dB (Decibel)

$$MCD = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{2 \sum_{n=1}^N (c_n^{(1)}(t) - c_n^{(2)}(t))^2} \quad (1)$$

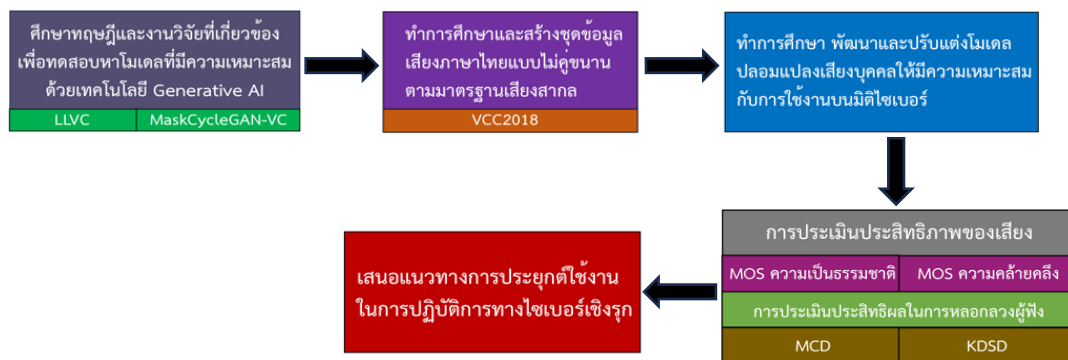
โดยที่	N	คือ	จำนวนมิติของ MCC ที่ใช้
	$c_n^{(1)}(t)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ MCC ของเสียงต้นฉบับในมิติที่ n และเฟรม t
	$c_n^{(2)}(t)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ MCC ของเสียงที่แปลงในมิติที่ n และเฟรม t

3.7.3 Kernel Deep Speech Distance (KDSD)

KDSD เป็นตัวชี้วัดการประเมินเชิงปริมาณที่ใช้วัดความคล้ายคลึงของคุณลักษณะเสียงระหว่างเสียงที่แปลงกับเสียงต้นฉบับ [25] โดยอาศัยข้อมูลเชิงลึกของเสียง (Embedding) ที่สกัดจากแบบจำลองการรู้จำเสียงพูด DeepSpeech2 [26] ซึ่งพัฒนาในปี 2016 รองรับภาษาอังกฤษและภาษาจีนกลาง ค่าที่ต่ำบ่งชี้ว่าเสียงที่แปลงมีคุณลักษณะเชิงลึกที่ใกล้เคียงกับเสียงต้นฉบับ โดยแสดงค่าในหน่วย KDSD

4. การดำเนินการวิจัย

จากรูปที่ 7 แสดงกรอบแนวคิดงานวิจัย โดยผู้วิจัยเริ่มต้นการวิจัยโดยศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระบวนการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการแปลงเสียงโดยใช้ LLVC และ MaskCycleGAN-VC ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เป็นต้นแบบการใช้งานแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด ร่วมกับชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นใหม่ตามมาตรฐานเสียงสากล VCC2018 โดยในขั้นตอนดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการปรับแต่งแบบจำลองปลอมแปลงเสียงให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานบนมิติไฮเบอร์ เช่น การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพและการทำงานของแบบจำลอง จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของเสียงโดยใช้ตัวชี้วัดได้แก่ 1) MOS ด้านความเป็นธรรมชาติ และด้านความคล้ายคลึง 2) MCD 3) KDSO รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพในการหลอกลวงผู้ฟัง สุดท้ายนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติการทางไซเบอร์เชิงรุก



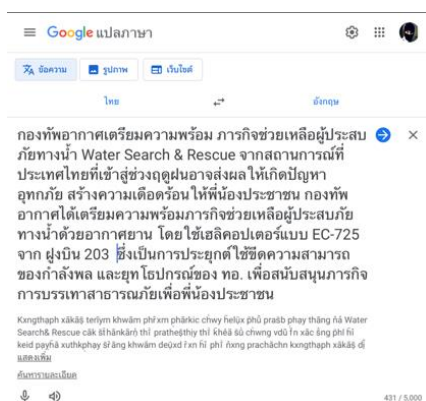
รูปที่ 7 กรอบแนวคิดงานวิจัย

4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทดสอบหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสม

ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรมในการสังเคราะห์เสียงด้วยระบบคอมพิวเตอร์ มี 2 วิธี ได้แก่

4.1.1 การแปลงข้อความเป็นเสียง

ผู้วิจัยได้ทดลองใช้การแปลงข้อความเป็นเสียงที่มีให้ใช้งานฟรีและรองรับภาษาไทย จากเว็บไซต์ระดับโลก เช่น Google Translate และ Speechify [27] โดยพิมพ์ข้อความภาษาไทยและกดฟังเสียงเพื่อรับฟังเสียงสังเคราะห์ที่ถูกสร้างจากข้อความ ดังรูปที่ 8



(ก) เว็บไซต์ Google Translate



(ข) เว็บไซต์ Speechify

รูปที่ 8 ทดลองใช้การแปลงข้อความเป็นเสียง

4.1.2 การแปลงเสียง

ผู้วิจัยได้ทดสอบแบบจำลองการแปลงเสียงด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด ประกอบด้วย LLVC [28] และ MaskCycleGAN-VC [14] โดยมีขั้นตอนดังนี้ 1) เตรียมทรัพยากรที่จำเป็นรวมถึงระบบปฏิบัติการและซอฟต์แวร์สำหรับแบบจำลอง โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมตามจากซอร์สโค้ดที่กำหนด 2) ทดสอบการฝึกฝนแบบจำลองโดยใช้ชุดข้อมูลเสียงเริ่มต้น 3) สร้างชุดข้อมูลเสียง NKRAFA Thai 4) ทดลองปรับแต่งการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการฝึกฝนแบบจำลองเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนมิติไซเบอร์ 5) วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสอง

4.2 ศึกษาและสร้างชุดข้อมูลเสียงภาษาไทย

ข้อมูลเสียงที่ใช้ในการฝึกฝนแบบจำลองถูกสร้างขึ้นใหม่ โดยใช้ชื่อ NKRAFA Thai Dataset ตามตารางที่ 1 ประกอบด้วยเสียงต้นแบบจากผู้วิจัย (SM01) และเสียงบุคคลเป้าหมายจากอาจารย์ (TM02, TF04, TF05) รวมถึงหัวหน้านักเรียนนายเรืออากาศ (TM03) ทั้งหมดรวม 5 คน ซึ่งได้ให้ความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรในการบันทึกเสียงเพื่อใช้ในการวิจัย โดยก่อนดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการทดสอบ ผู้วิจัยได้ชี้แจงถึงวัตถุประสงค์ของการวิจัยรวมถึงแนวทางการเก็บข้อมูลเสียงของกลุ่มตัวอย่างบนพื้นฐานของการรักษาข้อมูลส่วนบุคคล รวมถึงให้คำยืนยันว่าแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น ชุดข้อมูลนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน VCC2018 Dataset [29] ซึ่งออกแบบมาสำหรับงานแปลงเสียงโดยเฉพาะและถูกใช้ในงานวิจัยหลายฉบับ [12-14] โดยมีเสียงจากผู้พูดที่หลากหลายทั้งชายและหญิง

ตารางที่ 1 การใช้งาน VCC2018 Dataset ในงานวิจัย [14] และ NKRAFA Thai Dataset ในงานวิจัยนี้

Characteristic	VCC2018 Dataset	NKRAFA Thai Dataset
Record	High-quality microphones	(iPad) Built-in microphones
Bit Depth / Sampling Rate	16-bit / 22050 Hz	16-bit / 22050 Hz
Audio Type / Format	MONO / WAV	MONO / WAV
Content	Sentences spoken by Speakers	Sentences spoken by Speakers
Duration	Varies	Varies
Language	English	Thai
Source / Target Speakers	2 / 2	1 / 4
Parallel / Non-Parallel	Both	Non-Parallel
Training / Evaluation / Testing	81 / 35 files	100 / 25 / 10 files

4.3 ทำการศึกษาพัฒนาและปรับแต่งแบบจำลองปลอมแปลงเสียงบุคคลให้มีความเหมาะสม

เครื่องมือและอุปกรณ์งานวิจัย HP-Notebook CPU: Intel® Core™ i7-9750H @ 2.60GHz x 12, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1650 Mobile 4GB และ Primary/Secondary Storage: RAM 8 GB / SSD 512 GB

เนื่องจากข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์ตามขอบเขตงานวิจัยนี้ การใช้ Google Colab อาจเป็นทางเลือกที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ โดยสามารถเลือกใช้ GPU ของ Google เพื่อลดภาระการประมวลผลของเครื่อง ลดระยะเวลาในการฝึกฝนแบบจำลอง และจัดเก็บข้อมูลผ่าน Google Drive อย่างไรก็ตาม เวอร์ชันฟรีมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาการใช้งาน หากต้องการใช้งานต่อเนื่องหรือเพิ่มทรัพยากร อาจจำเป็นต้องสมัครบริการแบบชำระเงินซึ่งมาพร้อมกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น

ผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง MaskCycleGAN-VC โดยมีขั้นตอนการฝึกฝนแบบจำลอง ดังรูปที่ 9 และมีรายละเอียดการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- Epochs = 7000 รอบ เพื่อสังเกตแนวโน้มของค่าความผิดพลาดและประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยรวม อ้างอิงจากค่าเริ่มต้นที่กำหนดในซอร์สโค้ด

- Sampling Rate = 22050 Hz เพื่อให้สอดคล้องกันกับชุดข้อมูลเสียงที่จัดเตรียมไว้

- Batch Size = 4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาการฝึกฝนแบบจำลอง โดยเลือกค่าสูงที่สุดและเหมาะสมกับหน่วยความจำของ GPU ที่ใช้งาน

- Generator Learning Rate = 0.0002

- Discriminator Learning Rate = 0.0005 เพื่อช่วยให้โครงข่ายผู้แยกแยะแข็งแกร่งในช่วงแรกและเพื่อให้โครงข่ายผู้สร้างสามารถเรียนรู้ได้เร็วขึ้นและป้องกันปัญหาการฝึกที่ไม่สมดุลในระยะยาว

โดยที่

- Epochs คือ จำนวนรอบที่แบบจำลองฝึกฝนบนชุดข้อมูลทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบหนึ่งครั้ง

- Iterations คือ หนึ่งรอบของการประมวลผลข้อมูลหนึ่งชุด (Batch) ผ่านแบบจำลองในการฝึกฝน

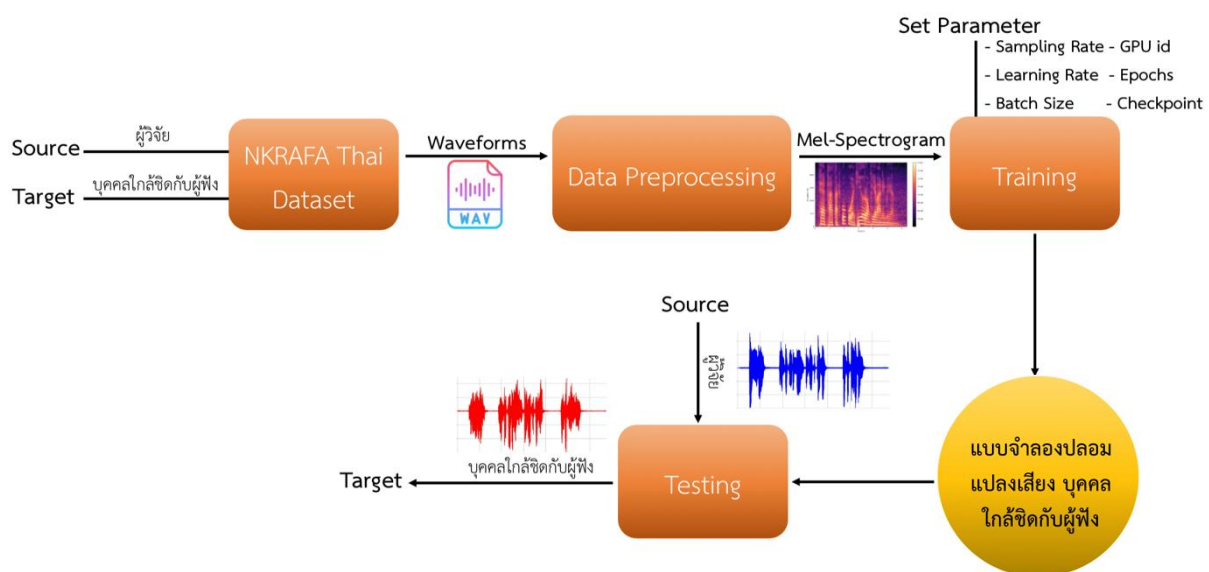
- Batch Size คือ จำนวนตัวอย่างข้อมูลที่แบบจำลองใช้ในการประมวลผล

- Generator Learning Rate คือ อัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายผู้สร้างในการฝึกแต่ละรอบ (Iteration) โดยอิงตามค่าความผิดพลาด (Loss) ที่ได้รับจากการคำนวณระหว่างเสียงปลอมที่สร้างขึ้นและเสียงจริง ซึ่งโครงข่ายผู้สร้างจะพยายามลดค่าความผิดพลาดนี้เพื่อสร้างเสียงปลอมที่เหมือนจริงมากขึ้น

- Discriminator Learning Rate คือ อัตราการเรียนรู้ของโครงข่ายผู้แยกแยะ ซึ่งทำหน้าที่แยกแยะว่าเสียงที่ได้รับเป็นเสียงจริงหรือเสียงปลอม โดยอิงตามค่าความผิดพลาดของโครงข่ายผู้แยกแยะที่เกิดจากการทำนายผิดพลาดว่าเสียงปลอมเป็นเสียงจริง หรือเสียงจริงเป็นเสียงปลอม ซึ่งโครงข่ายผู้แยกแยะจะพยายามลดค่าความผิดพลาดนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแยะข้อมูล

- GPU ID คือ ค่าที่กำหนดเพื่อระบุว่าจะใช้ GPU ตัวใดในการฝึกฝนแบบจำลอง

- Checkpoint คือ ไฟล์ที่บันทึกสถานะของแบบจำลองระหว่างการฝึกฝน รวมถึงน้ำหนักของแบบจำลอง ค่า Optimizer และจำนวน Epochs เพื่อให้สามารถหยุดการฝึกแล้วกลับมาฝึกต่อหรือการนำแบบจำลองไปใช้งานหรือปรับแต่งเพิ่มเติมได้ในภายหลัง



รูปที่ 9 ขั้นตอนการฝึกฝนแบบจำลอง

4.4 การประเมินประสิทธิภาพของเสียง

ผู้วิจัยได้ฝึกฝนแบบจำลองจนกระทั่งพร้อมใช้งาน จำนวน 4 แบบจำลอง สำหรับการนำไปใช้งานจริง จะพิจารณาคัดเลือกเวอร์ชันที่มีค่า Generator Loss น้อยที่สุด เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดว่าค่ายิ่งต่ำ ยิ่งสามารถสร้างเสียงปลอมที่ใกล้เคียงกับเสียงจริงได้มากที่สุด โดยใช้ 2 ตัวชี้วัดในการประเมินประสิทธิภาพดังนี้

4.4.1 ตัวชี้วัดการประเมินเชิงคุณภาพ

วัตถุประสงค์:

1) เพื่อประเมินคุณภาพเสียงปลอมที่ถูกสร้างจากแบบจำลองว่ามีคะแนนเฉลี่ยความคิดเห็นด้านความเป็นธรรมชาติและมีความคล้ายคลึงกันมากเพียงใด โดยมีระดับคะแนนดังนี้ 5: ดีเยี่ยม, 4: ดี, 3: พอใช้, 2: แย่, 1: แย่มาก

2) เพื่อประเมินประสิทธิผลในการหลอกลวงผู้ฟังสำหรับการใช้วิจารณ์ญาณของตนเองในการตัดสินใจว่าเสียงของบุคคลใกล้ชิดดังกล่าว คือ เสียงจริงหรือเสียงปลอม

กลุ่มตัวอย่าง: นักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 50 คน

รูปแบบการวัดผล: ผู้วิจัยออกแบบการประเมินจำนวน 50 ชุด (1 ชุด ต่อ 1 คน) โดยแต่ละชุดประกอบด้วยเสียงจริงและเสียงปลอมรวม 12 ไฟล์เสียง ทั้งนี้เสียงทั้งหมดถูกสุ่มจากชุดเสียงจริงและเสียงปลอมที่คัดเลือกไว้ล่วงหน้าและผ่านการตรวจสอบความสมบูรณ์แล้ว

ขั้นตอนการวัดผล: ผู้วิจัยเริ่มต้นจากอธิบายวัตถุประสงค์ของการดำเนินการวิจัยให้กับกลุ่มตัวอย่างฟัง หลังจากนั้นเปิดตัวอย่างเสียงครั้งละ 1 เสียง เมื่อกลุ่มตัวอย่างฟังเสร็จในแต่ละเสียง กลุ่มตัวอย่างจะให้คะแนนคุณภาพเสียงทั้งในด้านความเป็นธรรมชาติและความคล้ายคลึง รวมทั้งตัดสินใจว่าเสียงที่ได้ยินว่าเป็นเสียงจริงหรือเสียงปลอม ซึ่งแบบประเมินจะถูกบันทึกโดยผู้วิจัย ดังรูปที่ 10

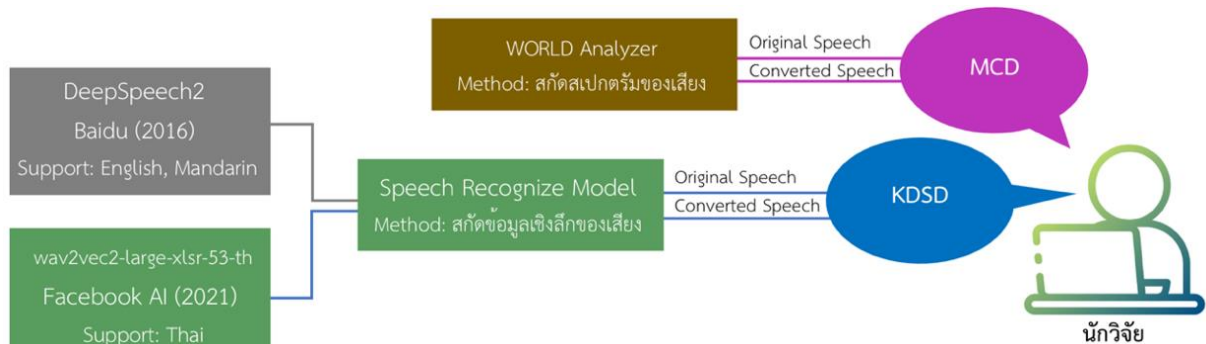


รูปที่ 10 ตัวชี้วัดการประเมินเชิงคุณภาพ

4.4.2 ตัวชี้วัดการประเมินเชิงปริมาณ

ผู้วิจัยได้คำนวณค่าความแตกต่างเชิงพลังงานระหว่างเสียงที่แปลงกับเสียงต้นฉบับ (พูดภาษาไทยประโยคเดียวกัน) โดยใช้ MCD เนื่องจากเอกสารวิจัยต้นฉบับมิได้เปิดเผยซอร์สโค้ดในส่วนนี้ ผู้วิจัยจึงเขียนซอร์สโค้ดใหม่โดยอ้างอิงและปรับปรุงการคำนวณ MCD ในหน่วยเดซิเบลจากแบบจำลอง StarGAN-VC [30] ให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้และเป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน เพื่อความสอดคล้องในการเปรียบเทียบค่า MCD

สำหรับการวัดความคล้ายคลึงของคุณลักษณะเสียงระหว่างเสียงที่แปลงกับเสียงต้นฉบับ ผู้วิจัยได้ใช้ KDSD และเขียนซอร์สโค้ดใหม่ทั้งหมด โดยปรับเปลี่ยนแบบจำลองรู้จำเสียงพูดเป็น wav2vec2-large-xlsr-53-th [31] ปี 2021 ซึ่งรองรับภาษาไทยและพัฒนามาจาก Wav2Vec2 ของ Facebook AI [32] นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังนำเสนอค่า KDSD ในเกณฑ์ใหม่ที่เหมาะสมกับประโยคภาษาไทย ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวชี้วัดการประเมินเชิงปริมาณ

5. ผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทดสอบหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสม

5.1.1 การแปลงข้อความเป็นเสียง

ผลการศึกษาและทดลองใช้การแปลงข้อความเป็นเสียง จากเว็บไซต์ Google Translate และ Speechify ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Google Translate VS Speechify

เว็บไซต์การแปลงข้อความเป็นเสียง	Google Translate	Speechify
การรองรับภาษาไทย	✓	✓
การปรับความเร็วเสียง	ไม่มี	✓
ความเร็วในการแปลงเสียง	เร็วมาก	ช้า
เสียงผู้พูด	ไม่สามารถเลือกเสียงได้	เลือกเสียงผู้ชายและผู้หญิงได้
ความเป็นธรรมชาติ	มีความเป็นธรรมชาติระดับปานกลาง	มีความเป็นธรรมชาติมากกว่า
การถ่ายทอดอารมณ์ใกล้เคียงเสียงมนุษย์	ไม่มี	✓
จังหวะการพูดและการเว้นวรรค	อาจไม่สิ้นไหลในบางกรณี	มีการเว้นวรรคที่สมจริงมากขึ้น
วัตถุประสงค์หลัก	ใช้เพื่อฟังข้อความจากการแปลภาษา	ใช้เพื่อฟังข้อความทั่วไป
ข้อจำกัดของเวอร์ชันฟรี	ใช้งานได้ฟรี 100%	จำกัดจำนวนข้อความต่อวัน

5.1.2 การแปลงเสียง

ผลการศึกษาและทดลองใช้แบบจำลอง MaskCycleGAN-VC และ LLVC ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 MaskCycleGAN-VC VS LLVC

แบบจำลอง	MaskCycleGAN-VC	LLVC
สถาปัตยกรรม	Generative Adversarial Network	Generative Adversarial Network
ประเภทของการแปลงเสียง	One-to-One	Any-to-One
การสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction)	Mel-Spectrogram	Mel-Spectrogram
ตัวสังเคราะห์เสียง (Vocoder)	MelGAN	HiFi-GAN
ชุดข้อมูลเสียง	VCC2018	LibriSpeech360
ลักษณะของชุดข้อมูลเสียง	แบบไม่คู่ขนาน (ไฟล์เสียง)	แบบคู่ขนาน (ไฟล์เสียง+ไฟล์บทพูด)
การเรียนรู้ของแบบจำลอง	ใช้เทคนิค Cycle-Consistency Loss แปลงเสียงต้นฉบับพร้อมคงเนื้อหา เดิมไว้ เป็นเสียงของผู้พูดเป้าหมาย และใช้เทคนิค Filling in Frames (FIF) ช่วยให้แบบจำลองเติมเฟรม เสียงที่ขาดหาย ส่งผลให้การเรียนรู้ โครงสร้างเชิงความถี่และเวลา (Mel-Spectrogram) มีประสิทธิภาพ มากขึ้น	ใช้เทคนิค Waveformer Encoder- Decoder แยกเนื้อหาคำพูดออกจาก เสียงต้นฉบับแล้วสร้างเสียงใหม่ให้ เหมือนผู้พูดเป้าหมาย
การยอมรับว่าเป็นวิธีมาตรฐานในปัจจุบัน	✓	ไม่มี
การพัฒนาเวอร์ชันแบบจำลองอย่างต่อเนื่อง	✓ [11-14]	ไม่มี
การเผยแพร่ผ่านวารสารทางวิชาการ	✓	ไม่มี
ความสมบูรณ์ของทรัพยากร (Library)	✓	ไม่มี
โค้ดโอเพนซอร์สบนแพลตฟอร์ม GitHub	✓	✓
การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับฝึกฝน	ง่าย	ยาก
การประเมินเชิงคุณภาพด้วยค่า MOS	4.43 / 4.08	3.78 / 3.83
ความเป็นธรรมชาติ / ความคล้ายคลึง		
การใช้งานจริง	เหมาะสำหรับการแปลงเสียงที่ ต้องการคุณภาพสูง	เหมาะสำหรับการแปลงเสียงที่เป็น แบบเรียลไทม์

5.1.3 ความแตกต่างระหว่างการแปลงข้อความเป็นเสียงและการแปลงเสียง

ความแตกต่างระหว่างการแปลงข้อความเป็นเสียงและการแปลงเสียง ตามตารางที่ 4

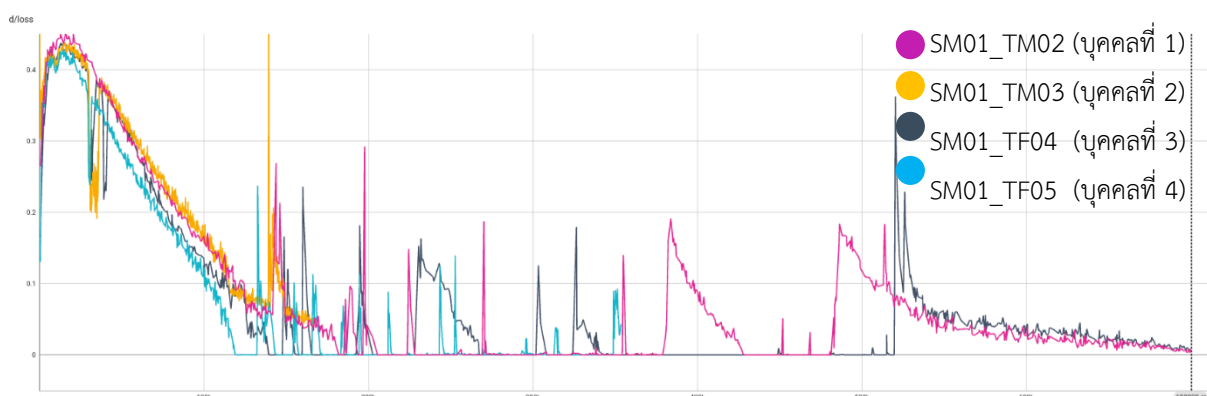
ตารางที่ 4 Text-to-Speech VS Voice Conversion

Speech Synthesis	Text-to-Speech	Voice Conversion
ความหมาย	เปลี่ยนข้อความเป็นเสียงพูด	เปลี่ยนเสียงพูดของบุคคลหนึ่งให้เหมือนกับเสียงของบุคคลอื่น
Input / Output	Text / Speech	Speech / Speech
ลักษณะของชุดข้อมูลเสียง	แบบคู่ขนาน (ไฟล์เสียง+ไฟล์บทพูด)	แบบไม่คู่ขนาน (ไฟล์เสียง)
ภาษาที่ใช้ในการฝึกฝน	ขึ้นกับภาษา	ไม่ขึ้นกับภาษา
วิธีการปกปิดตัวตนด้วยเสียง	✓	✓
ความเป็นธรรมชาติ	เสียงอาจฟังดูไม่เป็นธรรมชาติ	เสียงมีความเป็นธรรมชาติสูง
การใช้วิจารณ์งานในการตัดสินใจ	แยกแยะได้โดยง่าย	แยกแยะได้ยากเพราะเสียงมีความคล้ายคลึงกับต้นฉบับและเป็นธรรมชาติสูง
เทคโนโลยีที่เลือกใช้	- Convolutional Neural Network - Recurrent Neural Network - Generative Adversarial Network	- Convolutional Neural Network - Generative Adversarial Network
ตัวอย่างการใช้งาน	- เน้นอำนวยความสะดวก - ระบบผู้ช่วยเสียง / อ่านออกเสียง - ระบบนำทาง GPS - พากย์เสียง - ช่วยเหลือผู้พิการทางสายตา	- เน้นเลียนแบบเสียงบุคคล - สร้างเนื้อหาที่น่าดึงดูดใจ - ความบันเทิง - พากย์เสียง - ช่วยเหลือผู้ที่มีความผิดปกติในการพูด [33]

5.2 ผลการศึกษาพัฒนาและปรับแต่งแบบจำลอง MaskCycleGAN-VC ปลอมแปลงเสียงบุคคลให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานบนมิติไฮเบอร์

5.2.1 การฝึกฝนแบบจำลองที่จำนวน 7000 Epochs

ผลการทดลองดังรูปที่ 12, 13 และตารางที่ 5



รูปที่ 12 Discriminator Loss (7000 Epochs)



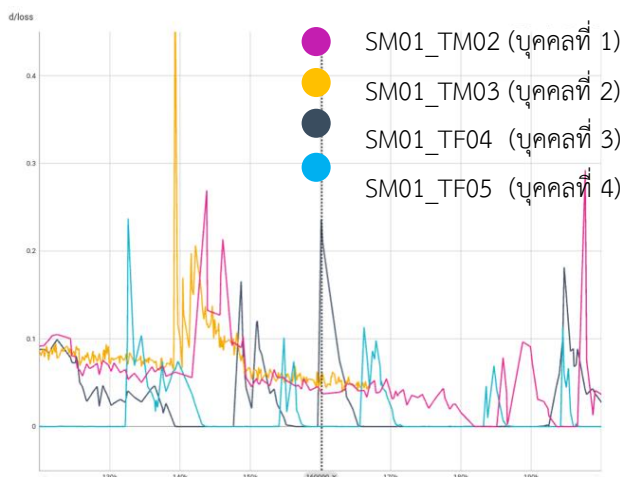
รูปที่ 13 Generator Loss (7000 Epochs)

ตารางที่ 5 การฝึกฝนแบบจำลอง (7000 Epochs)

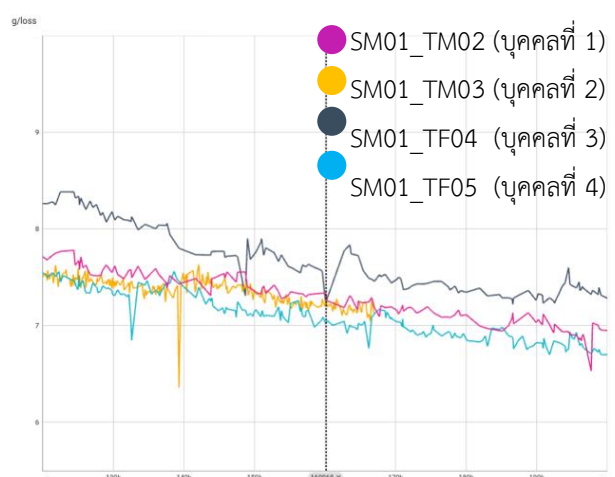
Model	Generator Loss	Discriminator Loss	Duration
SM01_TM02	5.7398	0.0060	106 ชั่วโมง
SM01_TF04	6.0054	0.0069	106 ชั่วโมง
Average	5.8726	0.0065	106 ชั่วโมง

5.2.2 การฝึกฝนแบบจำลองด้วยเทคนิค Early Stopping

ผลการทดลองดังรูปที่ 14, 15 และตารางที่ 6



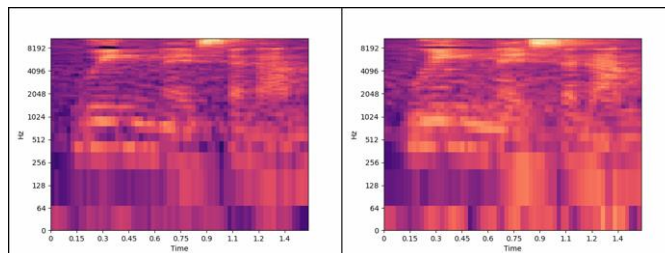
รูปที่ 14 Discriminator Loss (1600 Epochs)



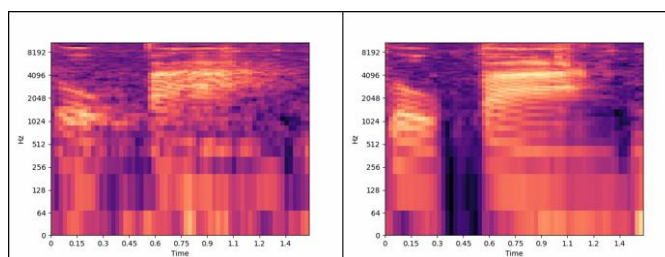
รูปที่ 15 Generator Loss (1600 Epochs)

ตารางที่ 6 การฝึกฝนแบบจำลอง (1600 Epochs)

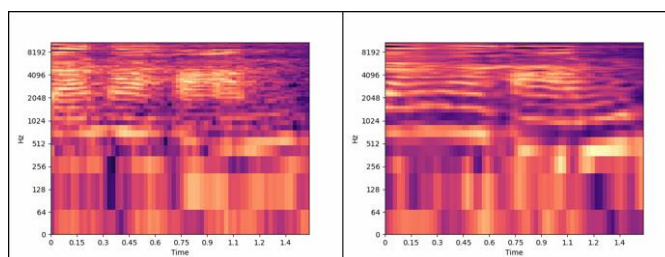
Model	Generator Loss	Discriminator Loss	Duration	Mel-Spectrogram
SM01_TM02	7.3355	0.0395	24 ชั่วโมง	ดังรูปที่ 16
SM01_TM03	7.2543	0.0475	24 ชั่วโมง	ดังรูปที่ 17
SM01_TF04	7.2170	0.2357	24 ชั่วโมง	ดังรูปที่ 18
SM01_TF05	7.0200	0.0002	24 ชั่วโมง	ดังรูปที่ 19
Average	7.2067	0.0807	24 ชั่วโมง	



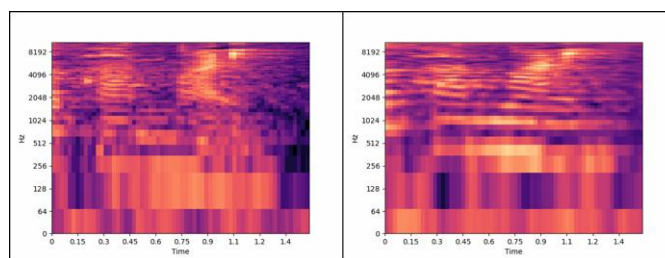
รูปที่ 16 Mel-Spectrogram เสียงจริง (ผู้วิจัย) แปลงเป็น เสียงปลอม (บุคคลเป้าหมายที่ 1)



รูปที่ 17 Mel-Spectrogram เสียงจริง (ผู้วิจัย) แปลงเป็น เสียงปลอม (บุคคลเป้าหมายที่ 2)



รูปที่ 18 Mel-Spectrogram เสียงจริง (ผู้วิจัย) แปลงเป็น เสียงปลอม (บุคคลเป้าหมายที่ 3)



รูปที่ 19 Mel-Spectrogram เสียงจริง (ผู้วิจัย) แปลงเป็น เสียงปลอม (บุคคลเป้าหมายที่ 4)

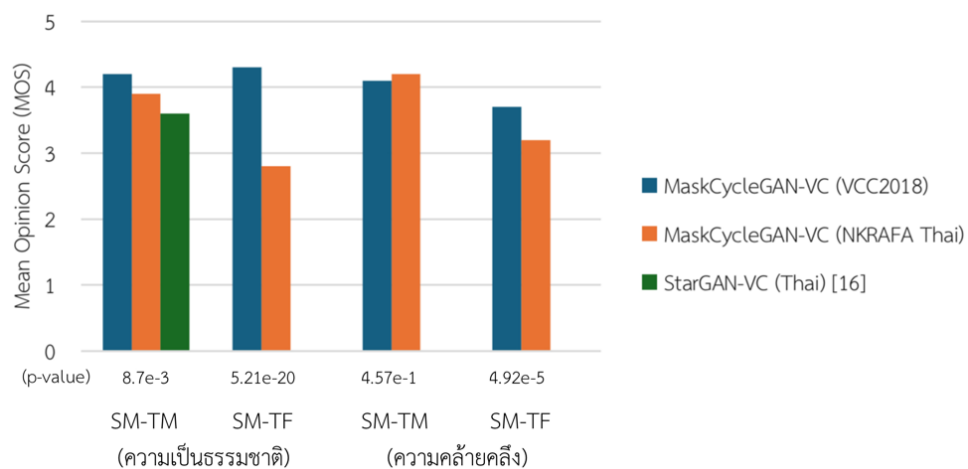
5.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพของเสียง

5.3.1 คุณภาพของเสียงที่ได้จากการแปลงเสียง

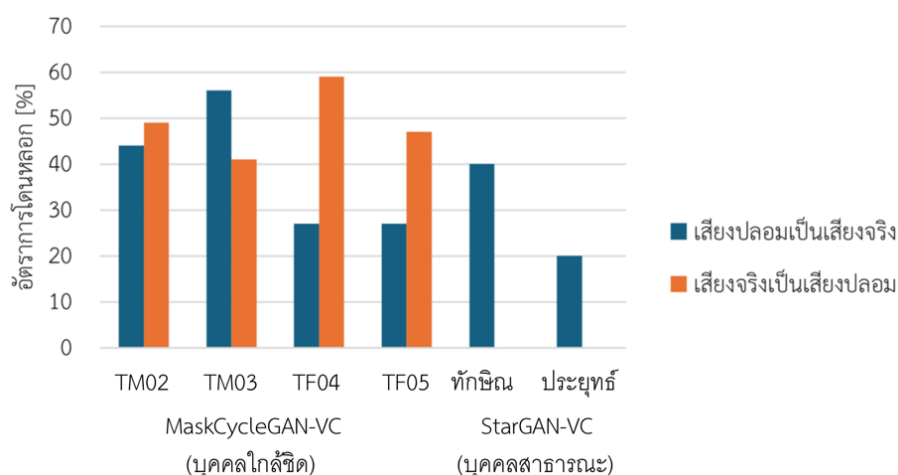
ผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่ามีสัญญาณรบกวนในระดับน้อยถึงปานกลาง ทำให้คุณภาพเสียงต่ำ และไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง เนื่องจากเสียงปลอมที่สร้างขึ้นสามารถแยกแยะได้ง่าย เช่น เสียงพูดไม่ชัด เสียงเพี้ยน หรือเสียงบิดเบี้ยวที่คล้ายเสียงเอเลี่ยน เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ผู้วิจัยจึงคัดเลือกเฉพาะเสียงปลอมที่มีคุณภาพดี และเพิ่ม สัญญาณรบกวนให้เสียงจริงอยู่ในระดับใกล้เคียงกับเสียงปลอม เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพมีความยุติธรรมมากขึ้น

5.3.2 ผลการประเมินเชิงคุณภาพ

ผลการประเมินคุณภาพเสียงด้วยค่า MOS และการทดสอบทางสถิติด้วย One-sample T-test ดังรูปที่ 20 และผลการประเมินประสิทธิผลในการหลอกลวงผู้ฟัง ดังรูปที่ 21



รูปที่ 20 การประเมินคุณภาพเสียงด้วยค่า MOS (ค่า Confidence Intervals ที่ 95%)



รูปที่ 21 การประเมินประสิทธิผลในการหลอกลวงผู้ฟัง

5.3.3 ผลการประเมินเชิงปริมาณ

ผลการประเมินเชิงปริมาณด้วยค่า MCD และ KDSD ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแตกต่างระหว่างเสียงที่แปลงกับเสียงต้นฉบับ ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การประเมินเชิงปริมาณด้วยค่า MCD และ KDSD

ลำดับ	ชุดข้อมูล	แบบจำลองรู้จำเสียงพูด	MCD [dB] / KDSD [KDSD]	
			SM-TM (ชาย-ชาย)	SM-TF (ชาย-หญิง)
1	NKRAFA Thai	wav2vec2-large-xlsr-53-th (2021)	6.01 / 15.90×10^{-3}	5.00 / 16.23×10^{-3}
2	VCC2018	DeepSpeech2 (2016)	6.77 / 83.8×10^5	7.64 / 502×10^5

5.4 การอภิปรายผล

5.4.1 การแปลงข้อความเป็นเสียง

ตามตารางที่ 2 พบว่า การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ หากต้องการระบบอ่านออกเสียงที่มีความรวดเร็วและใช้งานฟรี Google Translate จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เน้นการใช้งานแปลภาษาเป็นหลัก โดยไม่แน่ใจว่าจะต้องแปลงเป็นเสียงบุคคลใด ทำให้มีความซับซ้อนน้อยกว่า แต่หากต้องการคุณภาพเสียงที่สมจริง Speechify จะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า

5.4.2 การแปลงเสียง

ตามตารางที่ 3 พบว่า การเลือกใช้แบบจำลองขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงาน หากต้องการการแปลงเสียงที่มีคุณภาพสูง MaskCycleGAN-VC จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นการแปลงเสียงรูปแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ทำให้สามารถเรียนรู้เสียงบุคคลเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ และใช้เทคนิค Cycle-Consistency และ FIF เป็นการเพิ่มคุณภาพเสียงที่แปลงให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้นโดยที่ยังคงเนื้อหาเดิมไว้ รวมถึงใช้ชุดข้อมูลเสียงแบบไม่คู่ขนานซึ่งสามารถเตรียมได้ง่ายกว่า ขณะที่ LLVC เหมาะสำหรับการแปลงเสียงที่ต้องการความเร็วแบบเรียลไทม์ แต่มีข้อจำกัดด้านคุณภาพเสียงที่ต่ำกว่า

5.4.3 ความแตกต่างระหว่างการแปลงข้อความเป็นเสียงและการแปลงเสียง

ตามตารางที่ 4 พบว่า การแปลงข้อความเป็นเสียงและการแปลงเสียง มีจุดประสงค์และแนวทางที่ต่างกัน โดยการแปลงข้อความเป็นเสียงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการระบบอ่านออกเสียง ขณะที่การแปลงเสียงเป็นการเปลี่ยนเสียงของบุคคลหนึ่งให้คล้ายกับอีกบุคคลเหมาะสำหรับงานที่มุ่งเน้นการสร้างเสียงที่สมจริงและเป็นธรรมชาติ

5.4.4 การฝึกฝนแบบจำลองที่จำนวน 7000 Epochs

ดังรูป 12, 13 และ ตารางที่ 5 พบว่า ค่า Generator Loss ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและเริ่มเข้าสู่จุดอิ่มตัวที่ประมาณ 4000 - 5000 Epochs ขณะที่ Discriminator Loss มีค่าต่ำมาก แสดงว่าโครงข่ายผู้แยกแยะมีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกเสียงจริงกับเสียงปลอม อย่างไรก็ตาม การลดลงของ Generator Loss ที่ช้าลงบ่งบอกถึงข้อจำกัดของแบบจำลองในการปรับปรุงคุณภาพเสียงเพิ่มเติม ซึ่งอาจใช้เทคนิค Early Stopping หรือปรับ Learning Rate เพื่อลดเวลาฝึกควบคู่กับการฟังตัวอย่างเสียงเพื่อประเมินคุณภาพก่อนนำไปใช้งานจริง

5.4.5 การฝึกฝนแบบจำลองด้วยเทคนิค Early Stopping

ดังรูปที่ 14, 15 และ ตารางที่ 6 พบว่า การหยุดการฝึกที่จำนวน 1600 Epochs เป็นแนวทางที่เหมาะสมเพื่อลดเวลาฝึก โดยผู้วิจัยพิจารณาจำนวนดังกล่าวนี้จากจุดตัดของกราฟที่ได้จากการสังเกตแนวโน้มของค่า

ความผิดพลาดและประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยรวม ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาประสิทธิภาพของแบบจำลองได้โดยไม่ต้องใช้ทรัพยากรเกินจำเป็น

5.4.6 คุณภาพของเสียงที่ได้จากการแปลงเสียง

ปัญหาคุณภาพเสียงในงานวิจัยนี้เกิดจาก NKRAFA Thai Dataset ที่ใช้ยังไม่เทียบเท่ากับมาตรฐานอย่าง VCC2018 Dataset ซึ่งได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับงานแปลงเสียง ปัญหาหลักมาจากกระบวนการเก็บตัวอย่างเสียงที่อาจไม่มีการควบคุมปัจจัยสำคัญ เช่น ระยะไมค์จากแหล่งกำเนิดเสียง ชนิดของไมโครโฟนที่ใช้ในการบันทึก ความแรงของสัญญาณรบกวนภายนอก และสภาพแวดล้อมของห้องอัดเสียง หากไม่มีการจัดการที่ดี ปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในคุณลักษณะของเสียงที่ถูกบันทึก เช่น ความผิดเพี้ยนของโทนเสียง ระดับเสียงที่ไม่สม่ำเสมอ หรือความผิดพลาดในโครงสร้างทางสเปกตรัมของเสียง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเรียนรู้ของแบบจำลองโดยตรงทำให้ไม่สามารถสร้างเสียงที่มีคุณภาพสูงหรือใกล้เคียงกับต้นฉบับได้อย่างแม่นยำ คุณภาพของชุดข้อมูลจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องได้รับการพัฒนาเพื่อลดข้อผิดพลาดและปรับปรุงผลลัพธ์ของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

5.4.7 การประเมินเชิงคุณภาพ

ดังรูปที่ 20 พบว่า MaskCycleGAN-VC มีประสิทธิภาพสูงกว่า StarGAN-VC โดยเฉพาะในกรณีภาษาไทยที่มีค่าความเป็นธรรมชาติสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่าความคล้ายคลึงของเสียงในกรณีแปลงเพศเดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างชัดเจน ยกเว้นกรณีแปลงเสียงข้ามเพศที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดของชุดข้อมูล NKRAFA Thai เมื่อเทียบกับชุดข้อมูลมาตรฐาน VCC2018

ดังรูปที่ 21 พบว่า ผู้ฟังในกลุ่มบุคคลใกล้ชิดมีการตัดสินใจผิดพลาดใน 2 กรณีหลัก ได้แก่ 1) เสียงปลอมถูกตัดสินว่าเป็นเสียงจริง โดยมีอัตราการโดนหลอกสูงสุดถึง 56% ซึ่งมากกว่ากลุ่มบุคคลสาธารณะที่ผู้ฟังไม่คุ้นเคยกับเสียง แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการสร้างเสียงปลอมที่สามารถสร้างได้ใกล้เคียงจนยากต่อการตรวจจับ 2) เสียงจริงถูกตัดสินว่าเป็นเสียงปลอม โดยมีอัตราการโดนหลอกสูงสุดถึง 59% ซึ่งเห็นว่าสัญญาณรบกวนที่ใส่ในเสียงจริงมีผลกระทบต่อการตัดสินใจของผู้ฟังอย่างมีนัยสำคัญ ความคล้ายคลึงระหว่างเสียงจริงและเสียงปลอมในสถานการณ์ที่มีเสียงรบกวนทำให้เกิดความสับสนและความยากในการแยกแยะ สะท้อนถึงความท้าทายในการวิเคราะห์เสียงในสภาพแวดล้อมจริงและตอกย้ำว่าคุณภาพเสียงรวมถึงระดับสัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการวิจัยด้านเสียงปลอมแปลง

5.4.8 การประเมินเชิงปริมาณ

ตามตารางที่ 7 พบว่า MCD และ KDSD ในภาษาไทยมีค่าต่ำกว่าในภาษาอังกฤษ สะท้อนถึงความคล้ายคลึงของเสียงในภาษาไทยที่มากกว่า สำหรับ KDSD ที่มีค่าแตกต่างกันมากนั้น สาเหตุอาจมาจากการใช้เลือกใช้แบบจำลองรู้จำเสียงที่ทันสมัยในปัจจุบันและมีความเหมาะสมกับภาษาไทย นอกจากนี้วิธีการนี้ยังมีศักยภาพในการนำไปใช้ตรวจจับเสียงปลอมเบื้องต้น ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

5.5 การเผยแพร่ซอร์สโค้ดและชุดข้อมูลเสียง

ผู้วิจัยได้เผยแพร่ซอร์สโค้ด รวมถึง NKRAFA Thai Dataset ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ผ่านแพลตฟอร์ม GitHub เว็บไซต์ <https://github.com/NKRAFAVoiceAI/MaskCycleGAN-VC> เพื่อประโยชน์ในแวดวงงานวิจัยและการพัฒนาต่อยอดในอนาคต

6. สรุป

6.1 ผลการวิจัยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการปลอมแปลงเสียงบุคคลที่มีความเหมาะสม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประเภทของปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถนำมาใช้ในการปลอมแปลงเสียง พบว่า เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดที่ทันสมัยที่สุดและได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีมาตรฐานในปัจจุบัน คือ แบบจำลอง

MaskCycleGAN-VC มีศักยภาพสูงในการสร้างเสียงปลอมที่สมจริงเลียนแบบจังหวะ น้ำเสียง และอารมณ์ของเสียงต้นฉบับได้แม่นยำ โดยสามารถเรียนรู้จากข้อมูลเสียงที่ไม่คู่ขนาน เหมาะสำหรับการใช้งานในมิติไฮเบอร์ แม้ยังมีข้อจำกัดในกรณีเสียงมีสัญญาณรบกวนสูงหรือแปลงเสียงระหว่างเพศ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยเสนอทั้งการปรับแต่งแบบจำลองและการเตรียมชุดข้อมูลให้มีคุณภาพตรงตามมาตรฐาน

6.2 การพัฒนาและปรับแต่งแบบจำลองการปลอมแปลงเสียงด้วยปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดสำหรับการใช้งานบนมิติไฮเบอร์ แบบจำลอง MaskCycleGAN-VC ถูกเลือกเนื่องจากสามารถรักษาลักษณะเสียงได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น โดยมีการใช้เทคนิค Filling in Frames (FIF) เพื่อให้เสียงที่แปลงมีความต่อเนื่อง ปรับพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสม และใช้ Early Stopping ที่ 1600 Epochs เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลา อีกทั้งใช้ Mel-Spectrogram แทน MFCC ซึ่งเป็นการสกัดคุณลักษณะแบบเดิมที่ใช้ในงานวิจัยอื่นๆ เพื่อให้เรียนรู้โครงสร้างเสียงได้แม่นยำยิ่งขึ้น

6.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพและศักยภาพในการหลอกลวงโดยใช้เสียงปลอมแปลงที่สร้างจากแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินผลทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ พบว่า เสียงปลอมที่สร้างขึ้นมีค่า MOS สูงสุด 3.9 และความคล้ายคลึง 4.2 โดยสามารถหลอกผู้ฟังได้ถึง 56% และเสียงจริงถูกเข้าใจผิดว่าเป็นเสียงปลอมถึง 59% ในเชิงปริมาณ ค่า MCD ต่ำสุด 5.0 dB และ KDSD ต่ำสุด 15.9 mKDSD แสดงถึงคุณภาพเสียงปลอมที่ใกล้เคียงเสียงจริง

6.4 ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดในการปฏิบัติการทางไซเบอร์เชิงรุกซึ่งประกอบด้วย การใช้เสียงปลอมในงานข่าวกรอง การทดสอบระบบรักษาความปลอดภัย และการฝึกซ้อมรับมือภัยไซเบอร์ พร้อมเตือนถึงความเสี่ยงด้านจริยธรรมและความมั่นคงจากการใช้เทคโนโลยีในทางที่ผิด จึงเสนอให้พัฒนาเทคโนโลยีตรวจจับเสียงปลอมควบคู่กัน เพื่อป้องกันการใช้งานที่ไม่เหมาะสมและเสริมความมั่นคงทางไซเบอร์

7. ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดสามารถสร้างเสียงปลอมแปลงที่มีความสมจริงสูงจนยากที่มนุษย์จะตรวจจับได้ และจากการทดสอบพบว่าเสียงที่มีความยาว 3 วินาที ใช้ระยะเวลาในการแปลงเสียงเพียง 1.63 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและศักยภาพในการพัฒนาให้รองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์

สำหรับแนวทางการพัฒนาเพิ่มเติมผู้วิจัยเห็นว่าแบบจำลอง MaskCycleGAN-VC สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการสร้างเสียงได้โดยใช้ HiFi-GAN เป็นตัวสังเคราะห์เสียง เนื่องจากให้มีความถี่เสียงที่สูงขึ้น ลดปัญหาเสียงผิดเพี้ยน และสามารถสร้างเสียงที่มีความใกล้เคียงกับเสียงมนุษย์มากขึ้น อีกทั้งยังมีความเร็วในการสังเคราะห์สูง รองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้ MaskCycleGAN-VC สามารถแปลงเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและตอบโจทย์การใช้งานที่ต้องการความสมจริงและความรวดเร็ว

8. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยนี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณกองทัพอากาศที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้ดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่อนุญาตให้ใช้สถานที่เพื่อการวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการติดตามงานวิจัยและอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะ ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์และนักเรียนนายเรืออากาศที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และความยินยอมในการบันทึกและใช้เสียงเพื่อการวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรสำนักบัณฑิตศึกษาที่ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gartner, “Gartner Identifies Top Cybersecurity Trends for 2024” [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-02-22-gartner-identifies-top-cybersecurity-trends-for-2024>. (Accessed: July. 20, 2024).
- [2] M. Jovanović and M. Campbell, “Generative Artificial Intelligence: Trends and Prospects,” *IEEE Computer Society*, vol. 55, no. 10, pp. 107-112, 2022.
- [3] ฐานเศรษฐกิจ, “มีจลาชีฟใช้ AI Clone เสี่ยงหลอกโอนเงิน” [ออนไลน์]. Available: <https://www.thansettakij.com/technology/technology/576101>. (เข้าถึงเมื่อ: 20 กรกฎาคม 2567).
- [4] สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, “4 รูปแบบอาชญากรรมออนไลน์ที่ต้องจับตามองในปี 2567 เมื่อ AI ถูกใช้ในด้านมืดปลอมได้สารพัด” [ออนไลน์]. Available: <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=766631268843499>. (เข้าถึงเมื่อ: 20 กรกฎาคม 2567).
- [5] กระทรวงกลาโหม, “แผนการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ พ.ศ. 2566-2570” [ออนไลน์]. Available: <https://dstd.mod.go.th/getdoc/32fad3cd-50b1-46a0-b8b8-5c187ca9815a/planresearch-h-66-70.aspx>. (เข้าถึงเมื่อ: 23 กรกฎาคม 2567).
- [6] กองทัพอากาศ, “ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561-2580) (ฉบับปรับปรุงพ.ศ.2563)” [ออนไลน์]. Available: www.rtaf.mi.th/th/Documents/Publication/RTAF%20Strategy_Final_04122563.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 23 กรกฎาคม 2567).
- [7] กองทัพอากาศ, “นโยบายผู้บัญชาการทหารอากาศประจำปีพุทธศักราช 2567-2568” [ออนไลน์]. Available: <https://heyzine.com/flip-book/e12bf07274.html#page/1>. (เข้าถึงเมื่อ: 23 กรกฎาคม 2567).
- [8] สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, “ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580” [ออนไลน์]. Available: https://www.rat.chakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/A/082/T_0001.PDF. (เข้าถึงเมื่อ: 23 กรกฎาคม 2567).
- [9] ศูนย์ไซเบอร์กองทัพอากาศ, “ความรู้พื้นฐานสำหรับปฏิบัติการทางไซเบอร์ พ.ศ.2566” [ออนไลน์]. Available: <https://cybercenter.rtaf.mi.th/wp-content/uploads/2024/02/01.วิชาความรู้พื้นฐานสำหรับปฏิบัติการทางไซเบอร์-1.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ: 25 กรกฎาคม 2567).
- [10] T. Walczyna and Z. Piotrowski, “Overview of voice conversion methods based on deep learning,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, pp. 3100, 2023.
- [11] T. Kaneko and H. Kameoka, “CycleGAN-VC: Non-parallel Voice Conversion Using Cycle-Consistent Adversarial Networks,” in *2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2018, pp. 2100-2104.
- [12] T. Kaneko, H. Kameoka, K. Tanaka, and N. Hojo, “CycleGAN-VC2: Improved CycleGAN-based Non-parallel Voice Conversion,” in *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019, pp. 6820–6824.
- [13] T. Kaneko, H. Kameoka, K. Tanaka, and N. Hojo, “CycleGAN-VC3: Examining and Improving CycleGAN-VCs for Mel-spectrogram Conversion,” in *Proc. Interspeech*, 2020.

- [14] T. Kaneko, H. Kameoka, K. Tanaka, and N. Hojo, "MaskCycleGAN-VC: Learning Non-parallel Voice Conversion with Filling in Frames," in *Proc. ICASSP*, 2021, pp. 5919-5923.
- [15] I. H. Sarker, "Deep Learning: A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions," *Springer Journal*, vol. 2, no. 6, pp. 420, 2021.
- [16] พายัพ ศิรินาม และ ประสงค์ ปรานีตพลกรัง, "การพัฒนาโมเดลการเลียนเสียงเชิงลึกในการประยุกต์ใช้งานด้านสงครามไซเบอร์," *วารสารสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 162-178, มกราคม-มิถุนายน, 2566.
- [17] F. Khanam, F. A. Munmun, N. A. Ritu, A. K. Saha, and M. F. Mridha, "Text to Speech Synthesis: A Systematic Review, Deep Learning Based Architecture and Future Research Direction," *Journal of Advances in Information Technology*, vol. 13, no. 5, pp. 398-412, October 2022.
- [18] Y. A. Li, A. A. Zare, and N. Mesgarani, "StarGANv2-VC: A Diverse, Unsupervised, Non-parallel Framework for Natural-Sounding Voice Conversion," in *Proc. Interspeech*, 2021.
- [19] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, *รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่มที่ 4*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2563.
- [20] R. C. Streijl, S. Winkler, and D. S. Hands, "Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives," *Multimedia Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 213-227, March 2016.
- [21] X. Liang, Z. Bie, and S. Ma, "Pyramid Attention CycleGAN for Non-Parallel Voice Conversion," in *2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2022, pp. 139-143.
- [22] R. Kubichek, "Mel-cestral distance measure for objective speech quality assessment," in *Proc. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*, 1993, pp. 125-128.
- [23] M. Morise, F. Yokomori, and K. Ozawa, "WORLD: A vocoder-based high-quality speech synthesis system for real-time applications," *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. 99, no. 7, pp. 1877-1884, July 2016.
- [24] M. Shannon, "MCD: Mel-Cepstral Distortion" [Online]. Available: <https://github.com/MattShannon/mcd>. (Accessed: November. 12, 2024).
- [25] M. Binkowski, et al., "High fidelity speech synthesis with adversarial networks," in *Proc. ICLR*, 2020.
- [26] D. Amodei, et al., "Deep Speech 2: End-to-end speech recognition in English and Mandarin," in *Proc. ICML*, 2016, pp. 173-182.
- [27] Speechify, "Text-to-Speech Online in Thai," [Online]. Available: <https://speechify.com/text-to-speech-online/thai/>. (Accessed: July. 25, 2024).

- [28] K. Sadov, M. Hutter, and A. Near, “Low-latency real-time voice conversion on CPU,” [Online]. Available: <https://github.com/KoeAI/LLVC>. (Accessed: July. 25, 2024).
- [29] J. Lorenzo-Trueba, et al., “The Voice Conversion Challenge 2018: Promoting development of parallel and nonparallel methods,” in *Proc. The Speaker and Language Recognition Workshop (Odyssey 2018)*, Les Sables d’Olonne, France, Jun. 26–29, 2018.
- [30] S. Broughton, “Mel-Cepstral Distortion,” [Online]. Available: <https://github.com/SamuelBroughton/Mel-Cepstral-Distortion>. (Accessed: November. 12, 2024).
- [31] HuggingFace, “wav2vec2-large-xlsr-53-th,” [Online]. Available: <https://huggingface.co/aiereasearch/wav2vec2-large-xlsr-53-th>. (Accessed: November. 12, 2024).
- [32] A. Baevski, H. Zhou, A. Mohamed, and M. Auli, “wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations,” in *Proc. 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020)*, Vancouver, Canada, 2020.
- [33] H. Y. Lwin, W. Kumwilaisak, C. Hansakunbuntheung, and N. Thatphithakkul, “Alaryngeal Speech Generation Using MaskCycleGAN-VC and Timbre-Enhanced Loss,” in *Proc. 13th International Conference on Advances in Information Technology (IAIT 2023)*, December 06-09, Bangkok, Thailand, 2023.

การศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบ

A Comparative Study of Thailand's Eastern Aerotropolis and the Aerotropolis Model

เพ็ญสิริ เล่าสูอังกู¹, นปภา ปาทรมลพงษ์^{2*} และ คงศักดิ์ ชมชุม³

¹หลักสูตรการจัดการมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการการบิน สถาบันการบินพลเรือน

²กองวิชาภาษาอังกฤษและสนับสนุนการบิน สถาบันการบินพลเรือน

³กองวิชาช่างอากาศยาน สถาบันการบินพลเรือน

Pensiri Laosu-angkoon¹, Napapa Patarakamonpong^{2*} and Kongsak Chomchum³

¹Master of Management Program in Aviation Management, Civil Aviation Training Center

²Aviation Technical English Division, Civil Aviation Training Center

³Aircraft Maintenance Training Division, Civil Aviation Training Center

lptc@catc.or.th

Received 02 December 2024

Revised 09 April 2025

Accepted 18 April 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทย กับเมืองการบินต้นแบบ และ 2) เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาเมืองการบินภาคตะวันออก โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างพื้นฐาน ระบบคมนาคม พื้นที่ธุรกิจ พื้นที่อุตสาหกรรม และศูนย์กลางโลจิสติกส์ เพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จและอุปสรรคของการพัฒนาเมืองการบินในบริบทของประเทศไทย โดยศึกษาโมเดลเมืองการบินของเขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจ้จิว (ZAEZ) กับเมืองการบินภาคตะวันออก และนำมาเปรียบเทียบ ทั้ง 9 ด้าน ได้แก่ 1) การเชื่อมต่อสนามบินกับพื้นที่โดยรอบ 2) พื้นที่สำหรับการซ่อมบำรุงอากาศยาน 3) พื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรม 4) ศูนย์ธุรกิจขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ 5) พื้นที่ธุรกิจ 6) พื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย 7) พื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี 8) พื้นที่สำหรับการศึกษา และ 9) พื้นที่เพื่อสุขภาพ การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยใช้วิธีวิจัยเอกสาร (Documentary Research) ศึกษาข้อมูลจากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการสังเคราะห์ข้อมูลในเชิงเปรียบเทียบ โดยพิจารณาเกณฑ์การพัฒนาเมืองการบินที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล

ผลการวิจัยพบว่า เมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยมีโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมและระบบโลจิสติกส์ที่ได้รับการพัฒนาในระดับหนึ่ง เช่น การเชื่อมโยงระบบขนส่งหลายรูปแบบ (Multimodal Transportation) และการจัดสรรพื้นที่สำหรับธุรกิจและอุตสาหกรรมเฉพาะทาง อย่างไรก็ตาม เมืองการบินภาคตะวันออกยังมีข้อจำกัดในด้านศักยภาพของอุตสาหกรรมซ่อมบำรุงอากาศยาน การขาดแคลนแรงงานที่มีทักษะสูง รวมถึงความจำเป็นในการส่งเสริมการลงทุนและการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูง ข้อค้นพบจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้

เป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายเพื่อพัฒนาเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยให้มีศักยภาพในการแข่งขันระดับนานาชาติ โดยควรมีการบูรณาการแผนพัฒนาในระดับมหภาค ทั้งในด้านนโยบายภาครัฐ การส่งเสริมการลงทุนจากภาคเอกชน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ทันสมัย และการส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศ นอกจากนี้ การศึกษาต่อไปควรพิจารณาประเด็นด้านการบริหารจัดการพื้นที่และผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมของการพัฒนาเมืองการบินเพื่อให้ได้แนวทางการพัฒนาที่สมดุลและยั่งยืน

คำสำคัญ: เมืองการบิน, เมืองการบินภาคตะวันออก, เมืองการบินเขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจ็จโจว

Abstract

This research aims to 1) conduct a comparative study of Thailand's Eastern Aerotropolis and The Aerotropolis Model and 2) provide development guidelines for the Eastern Aerotropolis. The study emphasizes structural analysis in terms of infrastructure, transportation systems, business zones, industrial areas, and logistics hubs to identify key success factors and challenges for aerotropolis development in the Thai context. The research examined and compared the Zhengzhou Aerotropolis in China with the Eastern Aerotropolis in Thailand across nine key dimensions: 1) airport connectivity with surrounding areas, 2) aircraft maintenance zones, 3) industrial zones, 4) logistics and cargo business hubs, 5) commercial business zones, 6) residential areas, 7) technology innovation zones, 8) educational zones, and 9) healthcare zones. This study employed a qualitative research approach using documentary research methods. Data were gathered from primary and secondary sources, and a comparative data synthesis was conducted based on internationally recognized aerotropolis city development frameworks.

The findings revealed that the Eastern Aerotropolis in Thailand made progress in transportation infrastructure and logistics systems, particularly in multimodal transportation connectivity and designated zones for business and specialized industries. However, limitations remained in several areas, including the capacity of the aircraft maintenance industry, the shortage of highly skilled labor, and the need for greater investment in advanced technology and innovation. These findings can serve as a foundation for policy recommendations to enhance the competitiveness of the Eastern Aerotropolis at an international level. Key policy directions should include national-level strategic planning, government support, private sector investment incentives, modern infrastructure development, and strengthened international collaborations. Future research should explore urban management strategies and the economic and social impacts of aerotropolis

development to ensure balanced and sustainable growth.

Keywords: Aerotropolis, Eastern Aerotropolis, Aerotropolis Model

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการบินเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักที่สนับสนุนการเดินทางระหว่างประเทศ การขนส่งสินค้า และการเชื่อมโยงเศรษฐกิจระหว่างภูมิภาค ในช่วงก่อนการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 อุตสาหกรรมการบินของไทยมีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยจากสถิติการขนส่งผู้โดยสารในช่วงปี พ.ศ. 2552 - 2561 พบว่าจำนวนผู้โดยสารเพิ่มขึ้นจาก 58 ล้านคน เป็น 162 ล้านคน [1] ภายในระยะเวลาเพียง 9 ปี ซึ่งสะท้อนถึงความต้องการเดินทางที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับการเติบโตนี้ รัฐบาลได้ริเริ่มโครงการพัฒนาสนามบินอู่ตะเภาและเมืองการบินภาคตะวันออก ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงการสำคัญภายใต้ระเบียบเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor - EEC) [2] มีเป้าหมายให้ประเทศไทยเป็น "มหานครการบินภาคตะวันออก" และเป็นศูนย์กลางการบินแห่งใหม่ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการพัฒนาเมืองการบิน (Aerotropolis) จะเป็นแนวคิดที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล แต่การนำมาปรับใช้ในแต่ละประเทศยังคงมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐาน นโยบายทางเศรษฐกิจ และแนวทางการดึงดูดนักลงทุน เมืองการบินต้นแบบที่ประสบความสำเร็จ เช่น เขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจิ้งโจว (Zhengzhou Airport Economy Zone - ZAEZ) ของจีน เป็นตัวอย่างที่ชัดเจน [3] ของการพัฒนาเมืองการบินที่สามารถดึงดูดนักลงทุนระดับโลกให้เข้ามาดำเนินธุรกิจในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งความสำเร็จนี้เป็นผลมาจากการกำหนดนโยบายที่ชัดเจน โครงสร้างพื้นฐานที่ครบครัน และการบริหารจัดการที่เป็นระบบ [4]

เมื่อเปรียบเทียบกับเมืองการบินภาคตะวันออกของไทย แม้จะมีแนวทางพัฒนาที่มุ่งเน้นให้เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจและโลจิสติกส์ที่สำคัญของภูมิภาค [5] แต่ยังไม่มีการศึกษาที่ชัดเจนเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของเมืองการบินในประเทศอื่น ๆ และแนวทางที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย ในขณะเดียวกัน ยังขาดการศึกษาเปรียบเทียบเชิงลึกเกี่ยวกับแนวทางการพัฒนาเมืองการบินของไทยกับเมืองการบินที่ประสบความสำเร็จในต่างประเทศ ซึ่งถือเป็นช่องว่างขององค์ความรู้ที่จำเป็นต่อการกำหนดนโยบายพัฒนาเมืองการบินในอนาคต งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาว่าเมืองการบินภาคตะวันออกของไทยมีความเหมือนหรือแตกต่างจากโมเดล ZAEZ ของจีนอย่างไร โดยเฉพาะในแง่ของโครงสร้างพื้นฐาน นโยบายเศรษฐกิจ และกลยุทธ์การดึงดูดนักลงทุน อีกทั้งยังต้องการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ทำให้โมเดล ZAEZ ประสบความสำเร็จ และพิจารณาว่าปัจจัยเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับประเทศไทยได้หรือไม่ รวมถึงศึกษาว่าแนวทางการบริหารจัดการและการดึงดูดนักลงทุนของ ZAEZ แตกต่างจากเมืองการบินภาคตะวันออกของไทยอย่างไร โดยใช้หลักเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ เช่น โครงสร้างพื้นฐานด้านการบิน นโยบายพัฒนาเศรษฐกิจ และกลยุทธ์การดึงดูดการลงทุนจากต่างประเทศ

เพื่อให้การศึกษานี้มีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยจะใช้ ZAEZ ของจีนเป็นกรณีศึกษาหลัก เนื่องจากมีลักษณะคล้ายคลึงกับเมืองการบินภาคตะวันออกของไทยในด้านการพัฒนาเขตเศรษฐกิจโดยใช้สนามบินเป็นศูนย์กลาง นอกจากนี้ ยังมีการพิจารณาโมเดลเมืองการบินอื่น ๆ เช่น Dubai Aerotropolis และ Amsterdam Airport City [6] เพื่อใช้เป็นข้อมูลเสริมในการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยให้ภาครัฐและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถกำหนดแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาเมืองการบินภาคตะวันออกของไทย โดยอ้างอิงจากแนวปฏิบัติที่ประสบความสำเร็จของโมเดลเมืองการบินระดับโลก ซึ่งจะช่วยให้การพัฒนาเมืองการบินของไทยมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถแข่งขันในระดับสากลได้

2. ขอบเขตงานวิจัย

เปรียบเทียบด้านกายภาพของเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบเขตเศรษฐกิจพิเศษเจิ้งโจวของ ดร. จอห์น ดี คาร์ซาดา

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดเกี่ยวกับเมืองการบิน (Aerotropolis)

เมืองการบิน (Aerotropolis) เป็นแนวคิดการพัฒนาเมืองที่เน้นการเติบโตทางเศรษฐกิจรอบสนามบิน โดย ดร. จอห์น ดี. คาสาร์ด (John D. Kasarda) เป็นผู้เสนอแนวคิดนี้ ซึ่งมองว่าสนามบินไม่ใช่เพียงจุดรับส่งผู้โดยสารหรือศูนย์กลางโลจิสติกส์เท่านั้น แต่เป็นศูนย์กลางสำคัญของเมือง ที่สามารถเชื่อมโยงธุรกิจและเศรษฐกิจโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้นิยามว่าเมืองการบินคือเมืองที่มีการพัฒนา ในแง่ของโครงสร้างพื้นฐาน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และกิจกรรมทางเศรษฐกิจ เมืองเหล่านี้ได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างพื้นฐานที่เอื้อต่อการเดินทางและการขนส่งสินค้า รวมถึงเชื่อมโยงกับภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการบินและโลจิสติกส์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง [7] สนามบินมีความสำคัญกับการพัฒนาเมืองโดยในอดีต เมืองใหญ่เติบโตขึ้นจากการมีแหล่งน้ำและเส้นทางคมนาคม เช่น แม่น้ำ หรือทางรถไฟ แต่ในยุคปัจจุบัน สนามบินกลายเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเติบโตของเมือง โดยเฉพาะเมืองที่ต้องการเชื่อมต่อกับตลาดโลกอย่างรวดเร็ว สนามบินไม่ได้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นและปลายทางของการเดินทางเท่านั้น แต่เป็น ศูนย์กลางการพัฒนาเมือง ที่มีผลต่อเศรษฐกิจ การจ้างงาน การค้าระหว่างประเทศ และโครงสร้างพื้นฐาน เมืองที่มีสนามบินที่พัฒนาอย่างดีจะมีโอกาสเติบโตและแข่งขันในเวทีโลกได้ดียิ่งขึ้น โดยสนามบินไม่ได้เป็นเพียงจุดผ่านของผู้โดยสารหรือสินค้าระหว่างประเทศ แต่ยังเป็น ศูนย์กลางของการพัฒนาเมืองและเศรษฐกิจโดยรอบ สนามบินมีบทบาทเป็นจุดยุทธศาสตร์ในการดึงดูดธุรกิจที่ต้องการเข้าถึงตลาดโลกอย่างรวดเร็ว อาทิ อุตสาหกรรมโลจิสติกส์ การผลิตที่ต้องการขนส่งสินค้าแบบเร่งด่วน ศูนย์กลางการค้าระดับโลก ศูนย์ฝึกอบรมบุคลากรด้านการบิน และอาคารสำนักงานของสายการบินและบริษัทระหว่างประเทศ นอกจากนี้ ยังรวมถึงโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับธุรกิจบริการ เช่น โรงแรม ศูนย์ประชุม ศูนย์การค้า และที่พักอาศัยของแรงงานในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เมืองการบินต้องมีการบริหารจัดการแบบบูรณาการ ระหว่าง สนามบิน สายการบิน หน่วยงานภาครัฐ และองค์กรท้องถิ่น เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งรวมถึงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถรองรับการขยายตัวของธุรกิจการบิน การออกแบบพื้นที่เมืองให้เชื่อมโยงกับสนามบิน และการสร้างระบบโลจิสติกส์ที่สามารถลดต้นทุนด้านการขนส่งเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน [8] การพัฒนาเมืองการบินต้องอาศัยการออกแบบเชิงพื้นที่ที่มีสนามบินเป็นศูนย์กลาง และมีเครือข่ายการเดินทางที่สะดวก เช่น ทางด่วนพิเศษและรถไฟความเร็วสูง ที่เชื่อมต่อสนามบินกับเขตเศรษฐกิจสำคัญ ทำให้การเดินทางและขนส่งสินค้าระหว่างประเทศเป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ เมืองการบินที่ประสบความสำเร็จมักมี ระบบขนส่งโลจิสติกส์ที่ทันสมัย เช่น ศูนย์กระจายสินค้า อัจฉริยะ ระบบคลังสินค้าแบบอัตโนมัติ และเขตปลอดภาษีที่เอื้อต่อการดำเนินธุรกิจระหว่างประเทศ [9] เมืองการบินได้รับการพัฒนาในหลายประเทศทั่วโลก ตัวอย่างเมืองที่ประสบความสำเร็จ ได้แก่ เขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจิ้งโจว (Zhengzhou Airport Economy Zone - ZAEZ) ของจีน ซึ่งเป็นเมืองการบินต้นแบบที่สามารถดึงดูดการลงทุนจากบริษัทระดับโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้สนามบินเป็นศูนย์กลางของการพัฒนาเศรษฐกิจ นอกจากนี้ ยังมี Dubai Aerotropolis ของสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ ซึ่งพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานรอบสนามบินดูไบจนกลายเป็นศูนย์กลางการบินที่สำคัญของโลก และ Amsterdam Airport City ของเนเธอร์แลนด์ ซึ่งใช้สนามบินสคิปโฮลเป็นกลไกหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของเมือง [10]

ขั้นตอนการพัฒนาเมืองการบิน

1. การวางแผนเชิงยุทธศาสตร์

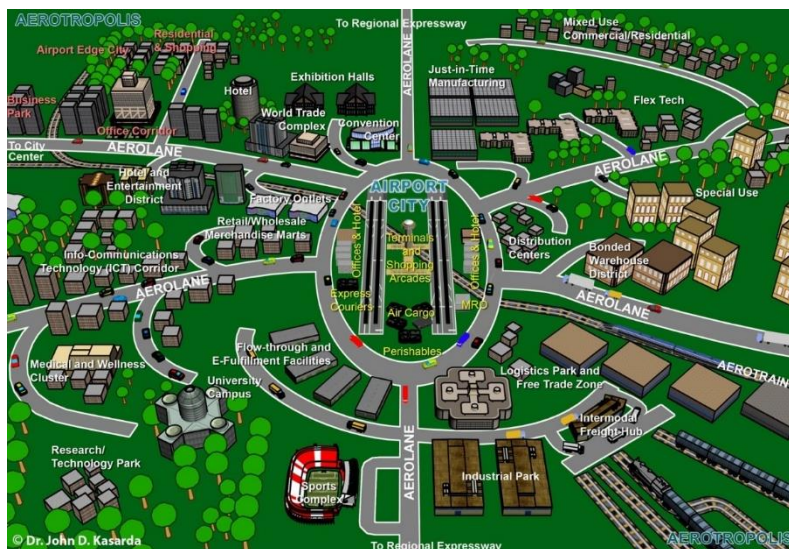
- กำหนดขอบเขตพื้นที่พัฒนาและศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ
 - วางแผนโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน ทางรถไฟ และระบบสาธารณูปโภค
2. การลงทุนและดึงดูดธุรกิจ
- รัฐบาลและเอกชนร่วมลงทุนพัฒนาโครงการ
 - ส่งเสริมให้บริษัทข้ามชาติและนักลงทุนเข้ามาจัดตั้งธุรกิจในเขตเมืองการบิน
3. การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน
- ก่อสร้างสนามบินให้ทันสมัย รองรับการขยายตัวของผู้โดยสารและสินค้าขนส่ง
 - สร้างระบบขนส่งและศูนย์กระจายสินค้าที่มีประสิทธิภาพ
4. การส่งเสริมเศรษฐกิจและนวัตกรรม
- พัฒนาเขตเศรษฐกิจพิเศษรอบสนามบิน
 - สนับสนุนอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น AI, Automation และ E-commerce

แนวคิดเมืองการบินได้รับการยอมรับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศที่ต้องการเป็นศูนย์กลางการบินระดับโลก โดยช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมขนส่งทางอากาศ สนับสนุนการค้า และกระตุ้นการลงทุนจากต่างประเทศ [11] สำหรับประเทศไทย การพัฒนาเมืองการบินเป็นกลยุทธ์สำคัญที่สามารถเสริมสร้างศักยภาพของประเทศให้เป็นศูนย์กลางการบินแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้อย่างแท้จริง อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของเมืองการบินไทยขึ้นอยู่กับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ทันสมัย นโยบายส่งเสริมการลงทุนที่เอื้อต่อธุรกิจ และการเชื่อมโยงเครือข่ายคมนาคมให้มีประสิทธิภาพเพื่อรองรับการแข่งขันในระดับสากล

3.2 แนวคิดเกี่ยวกับเขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจิ้งโจว (Zhengzhou Airport Economy Zone)

เขตเศรษฐกิจพิเศษอากาศยานเจิ้งโจว (ZAEZ) เป็นหนึ่งในโครงการพัฒนาเศรษฐกิจที่สำคัญของจีน โดยมุ่งใช้ สนามบินนานาชาติเจิ้งโจวซินเจิ้ง (Zhengzhou Xinzheng International Airport) เป็นศูนย์กลางในการพัฒนาเมืองและอุตสาหกรรมในระดับภูมิภาค ก่อนหน้านี เมืองเจิ้งโจว เป็นเมืองเกษตรกรรมและไม่ได้เป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจที่โดดเด่นมากนัก แต่ด้วยแนวคิด "เมืองการบิน" (Aerotropolis) ทำให้รัฐบาลจีนตัดสินใจผลักดันให้พื้นที่รอบสนามบินกลายเป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษ ที่มีการลงทุนสูงและสามารถเชื่อมต่อกับตลาดโลกได้ ในปี พ.ศ. 2556 (2013) รัฐบาลจีนประกาศจัดตั้ง ZAEZ โดยกำหนดให้เป็น ศูนย์กลางโลจิสติกส์ระหว่างประเทศ และฮับเศรษฐกิจการค้าสมัยใหม่ ซึ่งช่วยกระตุ้นการเติบโตของเมืองและเศรษฐกิจโดยรอบ พื้นที่ ZAEZ แบ่งออกเป็น 4 โซน ได้แก่ ตัวสนามบิน พื้นที่ด้านเหนือ พื้นที่ด้านตะวันออก และพื้นที่ด้านใต้ของสนามบิน โดยเขตสนามบินเป็นพื้นที่ประกอบธุรกิจโลจิสติกส์ การขนส่งและการกระจายสินค้าทางอากาศ (Shipping) คลังสินค้าอีคอมเมิร์ซ การผลิตชิ้นส่วนอากาศยานและการซ่อมบำรุง ฝั่งตะวันออกของสนามบิน เป็นพื้นที่สำหรับศูนย์การประชุม และการจัดแสดงต่าง ๆ มีการวางแผนไว้ว่าจะมีศูนย์กลางเมืองแห่งอนาคตในทางตะวันออกของสถานีรถไฟความเร็วสูง ซึ่งอยู่ไม่ห่างจากศูนย์รวมการจัดแสดง พื้นที่นี้จะเป็นเป้าหมายสำหรับสำนักงานใหญ่ขององค์กร และส่วนงานอื่น ๆ ขององค์กร การบริการด้านการเงิน ซึ่งรวมถึงตลาดหลักทรัพย์ Central Plains Stock Exchange การบริการของผู้ผลิต อาทิ การตรวจสอบ การให้คำปรึกษา การตลาด และแพลตฟอร์มธุรกิจออนไลน์ต่าง ๆ ทางตอนใต้ของเขตสนามบินเป็นเขตการผลิตระดับสูง ซึ่งเน้นดำเนินการผลิตด้วยความแม่นยำขั้นสูง ชีวการแพทย์ อุปกรณ์ IT และ ICT R&D และการผลิตวัสดุสำหรับเครื่องมือด้านอวกาศ เช่น วัสดุคาร์บอน-ไฟเบอร์ โพลีเมอร์ และเซรามิก ทางตอนเหนือของเขตสนามบินนั้นเป็นเป้าหมายของ (1) การบริการทางการเงินระหว่างประเทศ เช่น การให้เช่าเครื่องบิน (2) งานด้านวิทยาศาสตร์ และองค์ความรู้ เช่น วิศวกรรมซอฟต์แวร์ (3) สิ่งอำนวยความสะดวกด้านวัฒนธรรมและความบันเทิง และ (4) พื้นที่เชิงพาณิชย์/อยู่อาศัยร่วมกันโดยมีสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ สำหรับผู้บริหาร มีอาชีพ และผู้ทำงาน ซึ่งรวมถึง

สถาบันนานาชาติ K-12 ที่เปิดทำการในฤดูใบไม้ร่วงปี ค.ศ. 2015 ซึ่งมีวิทยาเขตที่คล้ายกับมหาวิทยาลัย ครูสอนภาษาอังกฤษ และหลักสูตรตะวันตกที่อิงจากสถาบันในซิลิคอนวัลเลย์ [4]



รูปที่ 1 โมเดลเมืองการบินของ ดร. จอห์นดี. คาสาร์ด (John D. Kasarda)

ในโมเดลเมืองการบินของ Dr. John D. Kasarda สนามบินจะทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์กลางเชื่อมโยงกับพื้นที่ต่าง ๆ ในเมือง ได้แก่ พื้นที่สำหรับธุรกิจโลจิสติกส์ พื้นที่สำหรับการซ่อมบำรุง พื้นที่สำหรับศูนย์การประชุมและการจัดแสดง พื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรม พื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี พื้นที่สำหรับการศึกษา พื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย และพื้นที่เพื่อสุขภาพ [4]

3.3 แนวคิดเกี่ยวกับโครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor: EEC)

โครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor : EEC) เป็นการต่อยอดการพัฒนาพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก มีเป้าหมายเพื่อยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันและทำให้เศรษฐกิจของไทยเติบโตได้ในระยะยาว EEC เป็นโครงการที่รัฐบาลผลักดันให้เป็นศูนย์กลางการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีแผนงานทั้งด้านการส่งเสริมการลงทุน การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่ง และสิ่งอำนวยความสะดวกที่เกี่ยวข้องเพื่อดึงดูดนักลงทุนทั้งไทยและต่างประเทศ โดยแนวทางการสนับสนุนด้านการลงทุน ได้แก่ 1) เรื่องที่ดิน (Land) ที่ EEC จะเตรียมความพร้อมและหารือร่วมกับนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ จัดสรรพื้นที่เชิญชวนให้เกิดการลงทุนเจาะเฉพาะแต่ละกลุ่มธุรกิจ 2) ด้านแรงงาน (Labor) เตรียมพัฒนาทักษะแรงงานขั้นสูงนำเสนอเป็นแพคเกจเพื่อจูงใจนักลงทุน ที่ EEC จะมีบุคลากรพร้อมรองรับการทำงานตรงความต้องการอุตสาหกรรม 3) Law and regulations เตรียมปรับปรุงกลไกทางกฎหมายและระเบียบให้ง่ายแก่การลงทุนและสามารถอำนวยความสะดวกแก่การเข้ามาประกอบกิจการในพื้นที่ และ 4) Logistics infrastructure ผลักดันให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งและโลจิสติกส์เพื่อลดต้นทุนในการประกอบกิจการ [2, 12-13]

3.4 แนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกองค์กรโดยใช้การวิจัยเอกสาร (Documentary Research)

การวิจัยเอกสาร (Documentary Research) เป็นกระบวนการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ เช่น หนังสือ วารสาร งานวิจัย รายงานภาครัฐ เอกสารเชิงวิชาการ และแหล่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง [14] เพื่อทำความเข้าใจและประเมินสภาพแวดล้อมขององค์กรทั้งภายในและภายนอก ซึ่งสามารถใช้แทน SWOT Analysis เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกและมีหลักฐานรองรับอย่างเป็นระบบการประเมินสภาพแวดล้อมภายในองค์กรโดยใช้การวิจัยเอกสาร

การศึกษาสภาพแวดล้อมภายในองค์กรผ่านการวิจัยเอกสารเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทรัพยากรและขีดความสามารถขององค์กร ซึ่งรวมถึงโครงสร้างองค์กร ระบบบริหารงาน แนวปฏิบัติภายใน วัฒนธรรมองค์กร และทรัพยากรที่สำคัญ ได้แก่ บุคลากร การเงิน วัสดุอุปกรณ์ และกระบวนการดำเนินงาน โดยสามารถศึกษาได้จากเอกสารภายใน เช่น รายงานประจำปี รายงานผลประกอบการ คู่มือปฏิบัติงาน และบทวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง การประเมินสถานะแวดล้อมภายในองค์กรถือเป็นกระบวนการสำคัญในการวิเคราะห์ ศักยภาพและความสามารถขององค์กร โดยการศึกษาความแข็งแกร่งและจุดอ่อนภายในองค์กร เพื่อวางแผนพัฒนากลยุทธ์ให้เหมาะสมและตอบสนองต่อความต้องการในตลาด การสร้างองค์กรระบบบริหารงานเกี่ยวข้อง แบบปฏิบัติการในองค์กร และการพัฒนาขององค์กรที่มีการปรับเปลี่ยนอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนนี้จะมีการพิจารณาเกี่ยวกับ ทรัพยากรที่สำคัญ เช่น บุคลากร วัสดุอุปกรณ์ และ กระบวนการทำงาน รวมถึงการศึกษามาตรฐานประจำปี รายงานผลประกอบการ ซึ่งจะช่วยในการประเมินผลขององค์กรในมุมมองที่หลากหลาย [15]

ตารางที่ 1 สรุป SWOT Analysis

องค์ประกอบ	รายละเอียด
จุดแข็ง (Strengths - S)	1. ความเชี่ยวชาญเฉพาะทางและเทคโนโลยีที่ทันสมัย 2. บุคลากรมีคุณภาพและระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ 3. โครงสร้างพื้นฐานที่แข็งแกร่ง เช่น ระบบไอที ระบบขนส่ง หรือเครือข่ายที่เอื้อต่อการเติบโต
จุดอ่อน (Weaknesses - W)	1. ระบบบริหารงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การสื่อสารที่ไม่ชัดเจน หรือขั้นตอนที่ซับซ้อน 2. ต้นทุนการดำเนินงานสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำกำไร 3. ขาดทรัพยากรหรือเทคโนโลยีที่ทันสมัย ทำให้ปรับตัวเข้าต่อการแข่งขัน 4. การขาดบุคลากรที่มีทักษะเฉพาะทาง ส่งผลต่อการดำเนินงานในสายงานสำคัญ
โอกาส (Opportunities - O)	1. แนวโน้มการตลาดที่เติบโตสูง เช่น ตลาดดิจิทัล E-commerce หรือบริการเฉพาะกลุ่ม 2. การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ เช่น AI, Big Data, Cloud Computing 3. พฤติกรรมของผู้บริโภคที่เปลี่ยนไป ซึ่งเปิดโอกาสให้พัฒนาสินค้าและบริการที่ตอบโจทย์มากขึ้น
อุปสรรค (Threats - T)	1. การแข่งขันที่รุนแรงในตลาด อาจทำให้ต้องลดราคา หรือลงทุนในนวัตกรรมสูง 2. การเปลี่ยนแปลงของกฎหมายและนโยบายภาครัฐ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อรูปแบบการดำเนินธุรกิจ 3. การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมผู้บริโภค หากองค์กรปรับตัวไม่ทัน อาจสูญเสียฐานลูกค้า

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้ใช้แนวทางการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Study) เพื่อศึกษาลักษณะและปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนาเมืองการบิน โดยยึดแนวคิดหลักประกอบการวิเคราะห์ ดังนี้

1. แนวคิดเมืองการบิน (Aerotropolis) ของ John D. Kasarda ซึ่งเสนอแนวคิดที่ว่า เมืองสามารถพัฒนาโดยมีสนามบินเป็นศูนย์กลางของระบบเศรษฐกิจ โดยรอบสนามบินจะประกอบไปด้วยโซนพาณิชย์ อุตสาหกรรม โลจิสติกส์ และที่อยู่อาศัย ซึ่งมีความเชื่อมโยงกันผ่านระบบคมนาคมขนส่งที่มีประสิทธิภาพ

2. แนวคิดเขตเศรษฐกิจพิเศษ (Special Economic Zone: SEZ) และกรณีศึกษาของ Zhengzhou Airport Economy Zone (ZAEZ) ในประเทศจีน ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวอย่างการพัฒนา Aerotropolis ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง มีการวางผังเมืองที่สอดคล้องกับระบบโลจิสติกส์ การลงทุนจากต่างชาติ และการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม

3. แนวคิดการพัฒนาภูมิภาคพิเศษ (Eastern Economic Corridor: EEC) ของประเทศไทย ซึ่งเป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีเป้าหมายในการยกระดับเขตพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกให้เป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจ การลงทุน เทคโนโลยี และการคมนาคม

4. แนวคิดการวิเคราะห์สิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกองค์กร (SWOT Analysis) เพื่อประเมินศักยภาพและข้อจำกัดของโครงการในแต่ละพื้นที่

5. แนวคิดการวิจัยเอกสาร (Documentary Research) ซึ่งเป็นวิธีการศึกษาโดยใช้เอกสารที่มีอยู่แล้ว เช่น รายงานทางวิชาการ บทความวิจัย นโยบาย และข้อมูลจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน

4.2 แหล่งข้อมูลและวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้จะอาศัยข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีผู้จัดเก็บไว้อยู่แล้ว โดยผู้วิจัยจะดำเนินการคัดเลือกและวิเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

1. รายงานการวิจัย และวิทยานิพนธ์ ที่เกี่ยวข้องกับ Aerotropolis เขตเศรษฐกิจพิเศษ และการวางแผนเมือง

2. เอกสารนโยบายจากหน่วยงานภาครัฐ เช่น สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.), กระทรวงคมนาคม, กระทรวงอุตสาหกรรม และสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)

3. บทความวารสารวิชาการ และสื่อสิ่งพิมพ์ ที่มีความน่าเชื่อถือ เช่น วารสารด้านการผังเมือง การคมนาคม โลจิสติกส์ และเศรษฐศาสตร์

4. เว็บไซต์อย่างเป็นทางการ ของโครงการ ZAEZ และโครงการ EEC เพื่อรวบรวมข้อมูลเชิงเทคนิค และข้อมูลเชิงกลยุทธ์

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้ จะใช้ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) และ การเปรียบเทียบแบบคงที่ (Constant Comparison) ร่วมกัน การเปรียบเทียบข้อมูลแต่ละกรณีอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เห็นความแตกต่างและแนวโน้มร่วม เพื่อให้เห็นความแตกต่างและความเหมือนของโมเดลการพัฒนา Aerotropolis ระหว่างโครงการในจีนและประเทศไทย โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. การจัดหมวดหมู่ข้อมูล ตามประเด็นสำคัญ เช่น โครงสร้างพื้นฐาน ระบบคมนาคม กลยุทธ์การพัฒนา พื้นที่ใช้งาน การลงทุน และผลกระทบด้านเศรษฐกิจและสังคม

2. การเปรียบเทียบจุดร่วมและจุดต่าง ของทั้งสองโครงการ ได้แก่ Zhengzhou Airport Economy Zone (ZAEZ) และโครงการพัฒนาเมืองการบินในพื้นที่ EEC ของไทย

3. การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) โดยนำเสนอข้อมูลในรูปแบบคำบรรยาย ตาราง และแผนภาพ เพื่อให้เห็นภาพรวมและข้อค้นพบอย่างเป็นระบบ

4. การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อเสนอข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย สำหรับการพัฒนาเมืองการบินในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับบริบทของประเทศ

5. ผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบทั้ง 9 ด้าน ได้แก่ 1) การเชื่อมต่อสนามบินกับพื้นที่โดยรอบ 2) พื้นที่สำหรับการซ่อมบำรุงอากาศยาน 3) พื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรม 4) ศูนย์ธุรกิจขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ 5) พื้นที่ธุรกิจ 6) พื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย 7) พื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี 8) พื้นที่สำหรับการศึกษา และ 9) พื้นที่เพื่อสุขภาพ สามารถสรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลดังกล่าวได้ดังตาราง ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบ

หัวข้อ	เมืองการบินต้นแบบ	เมืองการบินภาคตะวันออก
การเชื่อมต่อสนามบินกับพื้นที่โดยรอบ	มีทางหลวงพิเศษ ที่สามารถเชื่อมต่อสนามบินกับพื้นที่ชุมชน พื้นที่ธุรกิจ พื้นที่อุตสาหกรรม และพื้นที่ท่องเที่ยว รวมถึงรถไฟความเร็วสูงที่เชื่อมต่อเมืองต่าง ๆ	อยู่ระหว่างการดำเนินการ/ก่อสร้างทางหลวงพิเศษ รถไฟความเร็วสูง เชื่อมไปยังพื้นที่ต่าง ๆ
พื้นที่สำหรับการซ่อมบำรุงอากาศยาน	มีการจัดสรรพื้นที่ภายในสนามบิน สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน และการซ่อมบำรุง	อยู่ระหว่างการดำเนินการ/ก่อสร้างโครงการศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยาน อุตะเภา เพื่อยกระดับขีดความสามารถในการซ่อมบำรุงอากาศยานของไทย
พื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรม	มีการจัดตั้ง เขตพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีเชิงลึก เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง	อยู่ระหว่างการดำเนินการจัดตั้งเขตส่งเสริมเศรษฐกิจพิเศษเพื่อกิจกรรมอุตสาหกรรม เพื่อดึงดูดการลงทุนในอุตสาหกรรมเป้าหมาย
ศูนย์ธุรกิจขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์	มี Logistic Park ตั้งอยู่ที่เขตเศรษฐกิจสนามบินเชิงลึก สำหรับรองรับกิจกรรมด้านโลจิสติกส์	อยู่ระหว่างการดำเนินการ/ก่อสร้างธุรกิจขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ เพื่อเป็นศูนย์กลางและกระจายของขนส่ง 4 โหมดครบวงจร ทั้งทางอากาศ ทางราง ทางถนน และทางน้ำ หรือ Multimodal Transport
พื้นที่ธุรกิจ	มีการพัฒนาศูนย์กลางธุรกิจและการพาณิชย์เพื่อสนับสนุนการ	อยู่ระหว่างการดำเนินการ/ก่อสร้างโครงการศูนย์ธุรกิจอีอีซี เพื่อดึงดูด

หัวข้อ	เมืองการบินต้นแบบ	เมืองการบินภาคตะวันออก
	ดำเนินธุรกิจ ธุรกิจทางการเงิน และธุรกิจอื่น ๆ ภายในพื้นที่	กับกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจที่สอดคล้องและสนับสนุนอุตสาหกรรมเป้าหมาย
พื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย	มีการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ หรือ Smart City	อยู่ระหว่างการดำเนินการการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ หรือ Smart City
พื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี	มี Zhengzhou National High & New Technology Industries Development Zone สำหรับการวิจัย พัฒนา เทคโนโลยีและนวัตกรรม	อยู่ระหว่างการดำเนินการพัฒนาเขตส่งเสริมอุตสาหกรรมและนวัตกรรมดิจิทัล (EECd) สำหรับการวิจัย พัฒนา เทคโนโลยีและนวัตกรรม
พื้นที่สำหรับการศึกษา	มี มหาวิทยาลัยเจิ้งโจว Zhengzhou University (ZZU)	มีสถาบันการศึกษาหลายแห่งที่พร้อมให้การสนับสนุนและขับเคลื่อนอุตสาหกรรมเป้าหมาย
พื้นที่เพื่อสุขภาพ	มีการจัดตั้ง Zhengzhou Biomedical Industrial Park สำหรับการวิจัยและผลิตเวชภัณฑ์	อยู่ระหว่างการดำเนินการการจัดตั้งเขตส่งเสริมเศรษฐกิจพิเศษ การแพทย์ครบวงจร (EECmd) สำหรับการพัฒนา วิจัยด้าน การแพทย์

1. การเชื่อมโยงสนามบินกับพื้นที่โดยรอบ ก้าวสู่ศูนย์กลางโลจิสติกส์แห่งอนาคต การพัฒนาเมืองการบินในแต่ละประเทศล้วนมีเป้าหมายเพื่อสร้างศูนย์กลางเศรษฐกิจและโลจิสติกส์ที่มีศักยภาพสูง เชื่อมโยงการเดินทางและขนส่งสินค้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมืองการบินต้นแบบอย่าง Zhengzhou Aviation City ในประเทศจีน และโครงการ เมืองการบินภาคตะวันออก (EEC Aviation City) ของไทย ต่างมีแนวทางการพัฒนาและการเชื่อมโยงโครงสร้างพื้นฐานเพื่อสนับสนุนการขยายตัวของเศรษฐกิจการบินในอนาคต

หนึ่งในปัจจัยสำคัญของเมืองการบินคือโครงข่ายถนนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้สามารถเดินทางไปยังสนามบินได้สะดวกและรวดเร็ว สำหรับ Zhengzhou Aviation City ได้มีการให้บริการ ทางหลวงพิเศษ S1 (Zhengzhou Airport Expressway) ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับ ท่าอากาศยานนานาชาติเจิ้งโจวซินเจิ้ง (Zhengzhou Xinzheng International Airport) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการเดินทางและเพิ่มความคล่องตัวในการขนส่งสินค้า [4] ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออกของไทย กำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง ทางหลวงพิเศษพญา-มาบตาพุด (Motorway M7) ซึ่งจะเป็นเส้นทางสำคัญที่เชื่อมต่อสนามบินอยู่ติดกับพื้นที่เศรษฐกิจหลัก คาดว่าจะแล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2568 ซึ่งเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้วจะช่วยสนับสนุนการขนส่งทางบกของภาคตะวันออกให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [16] ศักยภาพของสนามบินไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรองรับผู้โดยสารและสินค้าเท่านั้น แต่ยังรวมถึงความสามารถในการเชื่อมต่อกับเมืองหลักเพื่ออำนวยความสะดวกในการเดินทาง สำหรับเมืองการบินต้นแบบอย่าง Zhengzhou Aviation City ทางหลวงพิเศษ S1 ได้รับการออกแบบให้เชื่อมต่อโดยตรงกับ ถนนวงแหวนตอนใต้ที่สาม (South 3rd Ring Road) ซึ่งสามารถเข้าสู่เขตเอ๋อฉี (Erqi District) ได้อย่างสะดวกสบาย ซึ่งเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจและการท่องเที่ยวสำคัญของเมือง [4] ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะภายในสนามบินอยู่ติดกัน โดยมีเส้นทาง

เดินรถโดยสาร 3 สาย ได้แก่ สาย 398 (ตราด-อุตะเถา), สาย 399 (ระยอง-อุตะเถา) และสาย 400 (ชลบุรี-อุตะเถา) ซึ่งจะช่วยให้ประชาชนสามารถเข้าถึงสนามบินได้สะดวกขึ้น [16]

เมืองการบินต้นแบบ Zhengzhou Aviation City ได้รับการออกแบบให้มี เส้นทางหลวงไห่ (Longhai Expressway) ที่เชื่อมไปยัง เขตกว่านเฉิง (Guancheng Hui District) ซึ่งเป็นชุมชนสำคัญของเมือง ช่วยให้ประชาชนสามารถเดินทางเข้าถึงสนามบินได้ง่ายและรวดเร็ว [4] ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังอยู่ระหว่างการพัฒนา โครงการรถไฟรางเบา ที่จะเชื่อมต่อกับ รถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 สนามบิน (ดอนเมือง-สุวรรณภูมิ-อุตะเถา) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทางและรองรับประชากรในเขตเมืองใหม่ที่กำลังขยายตัว [16] เมืองการบินต้องมี โครงสร้างพื้นฐานที่สามารถรองรับกิจกรรมทางธุรกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ Zhengzhou Aviation City มี ทางหลวงพิเศษ S1 ที่เชื่อมต่อกับ ถนนหงไห่ (Honghai Road) ซึ่งนำไปสู่ เขตจงหยวน (Zhongyuan District) ที่เป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูง (High Technology Manufacture and Development Zone) [4] ด้าน เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังดำเนินการก่อสร้าง ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสาย M7 ซึ่งจะเป็นเส้นทางเชื่อมต่อสำคัญระหว่างพื้นที่อุตสาหกรรมภาคตะวันออกกับกรุงเทพฯ และท่าเรือสำคัญต่าง ๆ เช่น ท่าเรือแหลมฉบัง และท่าเรือมาบตาพุด ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันด้านโลจิสติกส์ของประเทศ [16]

ในส่วนของระบบราง Zhengzhou Aviation City มีระบบ รถไฟความเร็วสูง (Aerotrain) ที่เชื่อมต่อเมืองหลักของจีนถึง 2 สาย ได้แก่ สายจาก สถานีรถไฟเจิ้งโจวด้านตะวันออก (Zhengzhou East Railway Station) เชื่อมไปยัง ปักกิ่ง-กวางโจว-ฮ่องกง (Beijing – Guangzhou – Hong Kong) และออกไปทางตะวันตกสู่ ซูโจว-หลานโจว (Xuzhou-Lanzhou) ส่วนอีกสายหนึ่งเชื่อมจาก สถานีรถไฟเจิ้งโจวด้านตะวันตก (Zhengzhou West Railway Station) ไปยัง ซีอาน (Xi'an) [4] ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออกของไทย กำลังพัฒนา โครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 สนามบิน (ดอนเมือง-สุวรรณภูมิ-อุตะเถา) ซึ่งจะเป็นโครงการสำคัญในการยกระดับการคมนาคมขนส่งของประเทศ ช่วยให้การเดินทางและขนส่งสินค้าระหว่างจังหวัดในภาคตะวันออกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วยิ่งขึ้น [16] การพัฒนาเมืองการบินเป็นกุญแจสำคัญในการยกระดับเศรษฐกิจของประเทศ โดยโครงสร้างพื้นฐานที่ทันสมัยและเครือข่ายการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพจะเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญสู่การเป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์ระดับโลก เมืองการบินต้นแบบ Zhengzhou Aviation City ได้มีการวางระบบขนส่งที่ครบวงจรและเชื่อมโยงกับพื้นที่สำคัญต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังเดินหน้าพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อให้สามารถก้าวไปสู่การเป็นศูนย์กลางการบินและโลจิสติกส์แห่งอนาคตของอาเซียน

2. ศูนย์กลางซ่อมบำรุงอากาศยาน เส้นทางสู่การเป็นผู้นำอุตสาหกรรมการบินของไทย อุตสาหกรรมการบินเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนและต้องการมาตรฐานสูง การซ่อมบำรุงอากาศยานจึงเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยให้การเดินทางทางอากาศเป็นไปอย่างราบรื่นและปลอดภัย ประเทศไทยเองกำลังเดินหน้าพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อเป็นศูนย์กลางซ่อมบำรุงอากาศยานที่ครบวงจร โดยมี เมืองการบินต้นแบบ และ ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานอุตะเถา เป็นโครงการหลักที่ขับเคลื่อนอุตสาหกรรมนี้ให้เติบโตขึ้น

เมืองการบินต้นแบบ ได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานที่รองรับเครื่องบินโบอิง 737-700 / 800 / 900 ให้บริการอย่างครบวงจร ตั้งแต่การตรวจสอบ การเปลี่ยนอะไหล่ การถอดรื้อและซ่อมแซมชิ้นส่วน ไปจนถึงการดัดแปลงเครื่องบิน นอกจากนี้ เมืองการบินต้นแบบยังเป็นศูนย์กลางของการผลิตชิ้นส่วนอากาศยานที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถของไทยในการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมการบินระดับโลก [4] ขณะเดียวกัน ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานอุตะเถา กำลังถูกพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางการซ่อมบำรุงอากาศยานที่สามารถให้บริการได้อย่างครอบคลุม โดยมีเป้าหมายในการยกระดับมาตรฐานของไทยให้ทัดเทียมศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานระดับสากล การดำเนินงานของศูนย์แห่งนี้ครอบคลุมงานซ่อมบำรุงทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นการซ่อมใหญ่อากาศยานที่ต้องใช้

เวลานาน การซ่อมบำรุงระดับลานจอดที่ช่วยให้เครื่องบินกลับมาพร้อมใช้งานได้อย่างรวดเร็ว หรือแม้แต่การพ่นสีอากาศยานเพื่อให้เครื่องบินคงสภาพที่ดีและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

อีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญของศูนย์ซ่อมบำรุงอุทสาหรณก็คือศูนย์บริการอะไหล่และอุปกรณ์ภาคพื้น ซึ่งช่วยให้การเปลี่ยนและซ่อมแซมชิ้นส่วนเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังมีการให้บริการซ่อมบำรุงเครื่องยนต์อากาศยาน การล้างทำความสะอาดเครื่องบิน และการบำรุงรักษาอากาศยานที่ต้องจอดระยะยาว ซึ่งเป็นอากาศยานที่รอการซ่อมใหญ่หรือรอการจำหน่าย สิ่งที่ทำให้ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานเหล่านี้โดดเด่นยิ่งขึ้น คือการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมช่างซ่อมบำรุงอากาศยาน เพื่อเพิ่มจำนวนบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในสาขานี้ รองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการบิน [17] การพัฒนาเมืองการบินต้นแบบและศูนย์ซ่อมบำรุงอุทสาหรณถือเป็นก้าวสำคัญของประเทศไทยในการเป็นศูนย์กลางซ่อมบำรุงอากาศยานในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ไม่เพียงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงอากาศยานที่ต้องส่งไปต่างประเทศ แต่ยังช่วยดึงดูดสายการบินและบริษัทอุตสาหกรรมการบินจากทั่วโลกให้เข้ามาใช้บริการในประเทศ หากไทยสามารถยกระดับมาตรฐานของศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยานให้เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติได้ ก็จะไม่เพียงสร้างรายได้มหาศาลเข้าสู่ประเทศ แต่ยังช่วยเสริมความแข็งแกร่งให้กับอุตสาหกรรมการบินไทยในเวทีโลกอีกด้วย

3. พื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรมการบิน ศูนย์กลางอุตสาหกรรมการบินแห่งอนาคตของไทย อุตสาหกรรมเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสร้างโอกาสใหม่ให้กับประเทศ โดยเฉพาะในยุคที่เทคโนโลยีและนวัตกรรมมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมให้ก้าวล้ำไปอีกขั้น ประเทศไทยจึงได้พัฒนา เมืองการบินต้นแบบ และ เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขึ้นมาเป็นพื้นที่รองรับการลงทุนในอุตสาหกรรมสำคัญระดับโลก เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถของประเทศในการเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมการบินแห่งอนาคต

เมืองการบินต้นแบบ ได้มีการวางแผนจัดสรรพื้นที่อุตสาหกรรมอย่างเป็นระบบ โดยพื้นที่ทางตอนใต้ของเมืองถูกกำหนดให้เป็นศูนย์กลางของการประกอบกิจการอุตสาหกรรม ซึ่งดึงดูดบริษัทระดับโลกให้เข้ามาลงทุน ที่สำคัญคือบริษัทผู้ผลิตเครื่องบินรายใหญ่จากไต้หวัน ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีการผลิตเครื่องบินที่ทันสมัย รวมไปถึงบริษัทที่เป็นผู้ผลิตและประกอบชิ้นส่วน iPhone ให้กับ Apple ที่เลือกตั้งฐานการผลิตในพื้นที่นี้เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดโลก พื้นที่แห่งนี้ไม่ได้เป็นเพียงศูนย์กลางการผลิตเท่านั้น แต่ยังกลายเป็น ศูนย์กลางนวัตกรรมและเทคโนโลยี ที่มีความพร้อมในการรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมยุคใหม่ ซึ่งรวมถึงการนำระบบอัตโนมัติและปัญญาประดิษฐ์ (AI) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน และช่วยให้ประเทศจีนสามารถแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมระดับโลกได้อย่างแข็งแกร่ง [4]

ในขณะเดียวกัน เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้รับการออกแบบให้เป็น เขตส่งเสริมเศรษฐกิจพิเศษ โดยใช้พื้นที่ในรัศมี 30 กิโลเมตรรอบสนามบินอุทสาหรณ เป็นศูนย์กลางการพัฒนาอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูง พื้นที่แห่งนี้ได้รับการจัดสรรให้รองรับการลงทุนใน อุตสาหกรรมเป้าหมาย ที่เป็นหัวใจของเศรษฐกิจอนาคต ซึ่งครอบคลุมอุตสาหกรรมที่หลากหลายและมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมหุ่นยนต์และอุตสาหกรรมดิจิทัล เป็นหนึ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมที่ได้รับการผลักดันอย่างมาก เนื่องจากเทคโนโลยีหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการดำเนินงานในอนาคต นอกจากนี้ อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ ก็กำลังเป็นที่จับตามอง เนื่องจากการเปลี่ยนผ่านไปสู่ ยานยนต์ไฟฟ้า (EV) และ เทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติ กำลังเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือจึงถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการผลิตและพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้

อีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญคือ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีสมัยใหม่ ไม่ว่าจะเป็น เซมิคอนดักเตอร์ ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และอุปกรณ์สวมใส่อัจฉริยะ การพัฒนา ศูนย์กลางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถรองรับการผลิตระดับสูงจึงเป็นเป้าหมายสำคัญของพื้นที่แห่งนี้ ในแง่ของ

อุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ เมืองการบินภาคตะวันออกได้รับการออกแบบมาเพื่อเป็นศูนย์กลางด้านการขนส่งและซ่อมบำรุงอากาศยาน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของห่วงโซ่อุปทานโลก การพัฒนาท่าอากาศยานอู่ตะเภาให้เป็นศูนย์กลางการบินแห่งอนาคตจะช่วยสนับสนุนอุตสาหกรรมด้านนี้ได้อย่างเต็มที่

นอกจากนี้ เมืองการบินภาคตะวันออกยังให้ความสำคัญกับ อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพและเคมีภัณฑ์ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนา พลังงานสะอาด และส่งเสริม เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ในประเทศ อีกทั้งยังมี อุตสาหกรรมการแพทย์ครบวงจร ที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีการแพทย์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และนวัตกรรมเพื่อสุขภาพที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในยุคใหม่ นอกจากนี้ อุตสาหกรรมอาหารและการท่องเที่ยวก็เป็นภาคส่วนที่ได้รับการสนับสนุน โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและการพัฒนาอาหารแห่งอนาคต เช่น อาหารโปรตีนจากพืช (Plant-based Food) และ อาหารจากเทคโนโลยีชีวภาพ

อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพและการท่องเที่ยวกลุ่มรายได้สูง ก็ได้รับความสำคัญเป็นพิเศษ โดยพื้นที่นี้จะถูกพัฒนาให้รองรับกลุ่มนักท่องเที่ยวที่มีกำลังซื้อสูงและต้องการประสบการณ์ท่องเที่ยวที่พรีเมียมและมีคุณภาพสูง ท้ายที่สุด ภาคเกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ ก็เป็นอีกหนึ่งกลุ่มอุตสาหกรรมที่ได้รับการสนับสนุน โดยมุ่งเน้นไปที่การเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) และ เทคโนโลยีชีวภาพที่ช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ด้วยการออกแบบให้รองรับอุตสาหกรรมเป้าหมายเหล่านี้ [18] เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกไม่ได้เป็นเพียงศูนย์กลางอุตสาหกรรมของประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังเป็นก้าวสำคัญที่ช่วยผลักดันให้ประเทศไทยกลายเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจใหม่ที่สามารถแข่งขันในเวทีโลกได้อย่างมั่นคง

4. ด้านศูนย์การขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ ก้าวสู่อนาคตของเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกในโลกของเศรษฐกิจยุคใหม่ โลจิสติกส์และการขนส่งสินค้ามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมและการค้าระหว่างประเทศ ระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนในการดำเนินธุรกิจ แต่ยังช่วยให้สินค้าสามารถเข้าถึงตลาดได้อย่างรวดเร็วและตรงเวลา ด้วยเหตุนี้ เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกจึงได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางด้านโลจิสติกส์และการขนส่งสินค้าในระดับภูมิภาค ซึ่งจะเป็หัวใจสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและการค้าของประเทศ เมืองการบินต้นแบบ ได้มีการจัดสรรพื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านโลจิสติกส์ใน เขตเศรษฐกิจสนามบินเจ็โจว ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงในการเชื่อมโยงระบบขนส่งสินค้าทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ ด้วยตำแหน่งที่ตั้งเชิงยุทธศาสตร์ เมืองการบินต้นแบบสามารถรองรับการขนส่งสินค้าทางอากาศที่รวดเร็ว รวมถึงการจัดการสินค้าผ่านเครือข่ายโลจิสติกส์ที่ครอบคลุม นอกจากนี้ โครงสร้างพื้นฐานของพื้นที่นี้ยังได้รับการพัฒนาให้ทันสมัย รองรับการทำงานของระบบคลังสินค้าอัจฉริยะและศูนย์กระจายสินค้าแบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้กระบวนการขนส่งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [4]

ขณะเดียวกัน เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังก้าวไปอีกขั้นด้วยการพัฒนา ศูนย์ธุรกิจขนส่งสินค้าและโลจิสติกส์ที่กำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง ศูนย์แห่งนี้ถูกออกแบบให้เป็น Multimodal Transport Hub หรือ ศูนย์กลางขนส่งหลายรูปแบบครบวงจร ที่รวมการขนส่งทั้งทางอากาศ ทางราง ทางถนน และทางน้ำเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อให้สามารถรองรับการขนส่งสินค้าได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพสูงสุด การขนส่งทางอากาศ เป็นหัวใจสำคัญของเมืองการบินภาคตะวันออก เนื่องจากสามารถรองรับการขนส่งสินค้าที่ต้องการความรวดเร็ว เช่น สินค้าอิเล็กทรอนิกส์ สินค้าเกษตรสด และสินค้าทางการแพทย์ ด้วยความสามารถในการจัดส่งภายในระยะเวลาอันสั้น ศูนย์ขนส่งสินค้าทางอากาศแห่งนี้จะเป็นจุดเชื่อมโยงสำคัญระหว่างตลาดในประเทศและตลาดต่างประเทศ

การขนส่งทางราง เป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้า โดยเชื่อมโยงกับเครือข่ายรถไฟความเร็วสูงและระบบรางคู่ของประเทศ ซึ่งช่วยให้การขนส่งสินค้าสามารถกระจายไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ได้รวดเร็วและมีต้นทุนที่ลดลง การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางรางยังช่วยให้เมืองการบินภาคตะวันออกสามารถเชื่อมต่อ

กับเครือข่ายโลจิสติกส์ระดับภูมิภาค เช่น จีน ลาว และเวียดนาม การขนส่งทางถนน เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยให้เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือกลายเป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์ที่สำคัญ พื้นที่นี้ได้รับการพัฒนาให้มีระบบโครงสร้างพื้นฐานทางถนนที่ทันสมัย เชื่อมโยงกับทางหลวงหลักของประเทศ ทำให้การขนส่งสินค้าทางรถบรรทุกเป็นไปได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และมีความปลอดภัย

การขนส่งทางน้ำ เป็นอีกหนึ่งช่องทางที่เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือให้ความสำคัญ โดยการเชื่อมต่อกับท่าเรือหลักของประเทศ เช่น ท่าเรือแหลมฉบัง และท่าเรือมาบตาพุด ซึ่งเป็นท่าเรือสำคัญในการนำเข้าและส่งออกสินค้าไปยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก การพัฒนาท่าเรือเชื่อมต่อกับศูนย์โลจิสติกส์นี้ช่วยให้สามารถลดต้นทุนและเวลาในการขนส่งสินค้าไปยังจุดหมายปลายทางต่าง ๆ ด้วยการออกแบบให้สามารถรองรับการขนส่งสินค้าหลายรูปแบบ เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะกลายเป็น ศูนย์กลางโลจิสติกส์ระดับโลก ที่สามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมยุคใหม่ ได้อย่างครบวงจร ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมการบินและโลจิสติกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ และ อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร [16]

การพัฒนาโครงการเหล่านี้ไม่เพียงช่วยเสริมศักยภาพของประเทศไทยในฐานะ ศูนย์กลางโลจิสติกส์ของภูมิภาค แต่ยังช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมไทย ทำให้สามารถรองรับการลงทุนจากต่างประเทศได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมให้ประเทศไทยกลายเป็น ศูนย์กลางการค้าและโลจิสติกส์ระดับโลก ที่สามารถเชื่อมโยงเครือข่ายการขนส่งสินค้าทั่วทั้งภูมิภาคเอเชียและโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. พื้นที่ธุรกิจ ศูนย์กลางธุรกิจ การค้า และไลฟ์สไตล์แห่งอนาคต เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือไม่ได้เป็นเพียงแค่ศูนย์กลางด้านโลจิสติกส์หรืออุตสาหกรรมเท่านั้น แต่ยังได้รับการพัฒนาให้เป็นพื้นที่ทางเศรษฐกิจที่ครบวงจร ด้วยการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางธุรกิจและการเงินที่สำคัญ ดึงดูดทั้งนักลงทุน นักธุรกิจ นักเดินทาง และนักท่องเที่ยวจากทั่วโลก ในส่วนของ โรงแรมระดับนานาชาติ เมืองการบินต้นแบบมีโรงแรมหรูที่ตั้งอยู่ใน เขตเจิ้งตงใหม่ (Zhengdong New Area) ซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจใหม่ของเมืองเจิ้งโจว โรงแรมที่มีชื่อเสียงและได้รับความนิยมในพื้นที่นี้ ได้แก่ JW Marriott Hotel Zhengzhou และ Sheraton Grand Zhengzhou Hotel ซึ่งให้บริการระดับพรีเมียมสำหรับนักธุรกิจ นักท่องเที่ยว และผู้เข้าร่วมการประชุมระดับนานาชาติ [4]

ขณะที่เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือกำลังพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในด้านการท่องเที่ยวและการประชุมสัมมนา ปัจจุบันอยู่ระหว่างการก่อสร้าง โรงแรมฮอลิเดย์อินน์ เอ็กซ์เพรส ระยะเวลาซึ่งตั้งอยู่บนทำเลที่สะดวกสบายริมถนนสุขุมวิท ถนนสายสำคัญที่เชื่อมโยงพื้นที่เศรษฐกิจ แหล่งท่องเที่ยว และศูนย์กลางธุรกิจของเมือง ด้วยทำเลที่เข้าถึงง่าย โรงแรมแห่งนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกให้กับนักธุรกิจและนักท่องเที่ยวที่เดินทางมายังพื้นที่ EEC [19] นอกจากนี้โรงแรมแล้ว ทั้งสองเมืองการบินยังให้ความสำคัญกับ ศูนย์ประชุมและแสดงสินค้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการดึงดูดการประชุมทางธุรกิจและนิทรรศการระดับนานาชาติ เมืองการบินต้นแบบมี ศูนย์ประชุมและแสดงสินค้าเจิ้งโจว (Zhengzhou International Conference and Exhibition Center - ZZICEC) อาคารสูง 6 ชั้น ที่สามารถรองรับผู้เข้าร่วมประชุมได้ถึง 3,160 คน และจัดงานเลี้ยงได้ถึง 1,660 คน ทำให้เป็นสถานที่จัดงานสำคัญทั้งในระดับภูมิภาคและระดับโลก [4]

ในขณะที่เมืองการบินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มี ศูนย์ประชุมและแสดงสินค้านานาชาติขนาดใหญ่มากกว่าหลายเท่า สามารถรองรับผู้เข้าร่วมประชุมได้มากถึง 12,000 คน และยังมี โรงแรมโนโวเทล ระยะเวลา สตาร์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ ที่อยู่ใกล้กับเขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ใช้เวลาเดินทางเพียง 30 นาที โรงแรมแห่งนี้มาพร้อมห้องประชุมขนาดใหญ่ที่สามารถรองรับได้ถึง 2,000 คน จึงกลายเป็นจุดหมายสำคัญของงานประชุมทางธุรกิจและอุตสาหกรรมที่ต้องการพื้นที่ที่สามารถรองรับผู้เข้าร่วมได้จำนวนมาก [19]

การพัฒนาย่านธุรกิจและการเงินเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยยกระดับเมืองการบินให้เป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจที่แข็งแกร่ง เมืองการบินต้นแบบมี ดิจเวิลด์เทรดคอมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นศูนย์กลางสำหรับการประชุมทางธุรกิจระดับ

นานาชาติ และเป็นสถานที่จัดการเจรจาการค้าสำคัญของประเทศทั้งในและต่างประเทศ [4] ส่วนเมืองการบินภาคตะวันออก มีย่านศูนย์กลางการเงินที่อยู่ใน เขต EEC (Eastern Economic Corridor) ซึ่งถูกออกแบบให้เป็นที่ตั้งของสำนักงานใหญ่ขององค์กรการเงินและเศรษฐกิจระหว่างประเทศ (International Headquarters: IHQs) รวมถึงศูนย์ธุรกิจระดับนานาชาติ ที่รองรับธุรกิจการเงิน การลงทุน และอุตสาหกรรมเป้าหมายของ EEC ซึ่งทำให้พื้นที่แห่งนี้กลายเป็นศูนย์กลางของการพัฒนาทางเศรษฐกิจของภูมิภาค [19]

นอกจากโครงสร้างพื้นฐานด้านธุรกิจแล้ว เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกยังเป็นแหล่งรวมของ ศูนย์ค้าปลีกและค้าส่งขนาดใหญ่ ที่ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและนักลงทุน เมืองการบินต้นแบบเป็น ที่ตั้งของ Wenbo Shopping Mall ซึ่งเป็นศูนย์ค้าส่งและค้าปลีกที่ใหญ่ที่สุดในเมืองเจิ้งโจว นอกจากนี้ยังมี Yinji Trade City ซึ่งเป็นศูนย์การค้าสำหรับสินค้าแฟชั่น เสื้อผ้า เครื่องแต่งกาย และเครื่องประดับ [4] สำหรับเมืองการบินภาคตะวันออกนั้น การพัฒนาย่านการค้าได้รับความสนใจเป็นพิเศษ โดยมี ศูนย์การค้าโรบินสัน โลฟิสโตล์ และห้างสรรพสินค้าโรบินสัน บ้านฉาง ซึ่งเป็นศูนย์กลางการค้าปลีกที่ครบวงจร จำหน่ายสินค้าในทุกหมวดหมู่ ตั้งแต่เครื่องแต่งกาย เครื่องสำอาง ของใช้ในบ้าน ไปจนถึงเครื่องใช้ไฟฟ้า [19]

จากการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ครบวงจร ทั้งโรงแรม ศูนย์ประชุม ศูนย์กลางธุรกิจ และแหล่งช้อปปิ้ง เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกกำลังก้าวขึ้นเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจที่สำคัญของภูมิภาคและระดับโลก ความพร้อมในทุกด้านของเมืองทั้งสองแห่งนี้ จะช่วยเสริมศักยภาพของประเทศไทยในการดึงดูดนักลงทุน นักธุรกิจ และนักท่องเที่ยวจากทั่วโลก และเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ช่วยให้ประเทศก้าวสู่การเป็นศูนย์กลางการค้าและการลงทุนที่สามารถแข่งขันในเวทีโลกได้อย่างเต็มศักยภาพ

6. พื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย วิสัยทัศน์ใหม่ของเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเมือง แนวคิด "เมืองอัจฉริยะ" (Smart City) กำลังกลายเป็นเป้าหมายสำคัญของการพัฒนาเมืองยุคใหม่ที่ต้องการเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยให้ดีขึ้น ควบคู่ไปกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและรักษาสีเขียวแวดล้อมให้ยั่งยืน เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกต่างให้ความสำคัญกับแนวคิดนี้ โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบพื้นที่อยู่อาศัยให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและรองรับไลฟ์สไตล์ของคนยุคดิจิทัล [4, 19] เมืองการบินต้นแบบ ได้รับการออกแบบให้เป็น เมืองอัจฉริยะที่สมบูรณ์แบบ โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนา Smart Energy เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารที่อยู่อาศัยในเมืองนี้มีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลและช่วยลดค่าไฟฟ้าสำหรับผู้พักอาศัย นอกจากนี้ยังมีการติดตั้ง หลอดไฟอัจฉริยะ LED ที่สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหวเพื่อสั่งเปิด-ปิดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ ช่วยประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

นอกจากเทคโนโลยีที่ช่วยให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพแล้ว เมืองการบินต้นแบบยังให้ความสำคัญกับแนวคิด Smart Living หรือ การอยู่อาศัยอัจฉริยะ ด้วยการนำ หุ่นยนต์อัจฉริยะ เข้ามาตรวจวัดคุณภาพอากาศ อุณหภูมิ และความชื้น เพื่อช่วยควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคารให้เหมาะสมกับสุขภาพของผู้อยู่อาศัย เทคโนโลยีเหล่านี้ช่วยให้ผู้อยู่อาศัยในเมืองสามารถใช้ชีวิตได้อย่างสะดวกสบาย ปลอดภัย และใส่ใจสุขภาพมากขึ้น [4] ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ โดยให้ความสำคัญกับการพัฒนา Smart Environment และ Smart Energy เมืองนี้มีการนำ ระบบการจัดการน้ำอัจฉริยะ เข้ามาใช้ โดยมุ่งเน้นไปที่การนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดการสิ้นเปลืองน้ำและช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีระบบ การจัดการไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ โดยการใช้พลังงานสะอาด เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการใช้พลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

นอกจากการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมแล้ว เมืองการบินภาคตะวันออกยังมีแนวคิดในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานให้รองรับ ไลฟ์สไตล์อัจฉริยะ เช่น ระบบขนส่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและเทคโนโลยี Internet of Things

(IoT) ที่ช่วยเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้อยู่อาศัย การพัฒนาพื้นที่อยู่อาศัยให้เป็นเมืองอัจฉริยะของทั้งเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก ไม่ได้เป็นเพียงแค่การใช้เทคโนโลยีเพื่อลดการใช้พลังงานหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินชีวิตเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เมืองเหล่านี้กลายเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการอยู่อาศัยของคนรุ่นใหม่ ที่ต้องการชีวิตที่สะดวกสบายและมีคุณภาพท่ามกลางเทคโนโลยีล้ำสมัยและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน [19]

7. พื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก ในยุคที่เทคโนโลยีกลายเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก กำลังถูกพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางนวัตกรรมระดับโลก โดยได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงและการวิจัยด้านดิจิทัล ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของประเทศ เมืองการบินต้นแบบ ตั้งอยู่ใน Zhengzhou National High & New Technology Industries Development Zone ซึ่งเป็นหนึ่งในเขตพัฒนาอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงของจีน พื้นที่นี้ถูกออกแบบให้เป็น ศูนย์กลางเทคโนโลยีระดับชาติ ที่รวบรวมห้องปฏิบัติการวิจัย ศูนย์พัฒนานวัตกรรม และบริษัทเทคโนโลยีชั้นนำที่มุ่งเน้นการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ล้ำสมัย นอกจากนี้ยังมี Hi-tech Industrial Park ซึ่งเป็นเขตอุตสาหกรรมไฮเทคที่เปิดโอกาสให้นักวิจัยและนักพัฒนาเทคโนโลยีสามารถทำงานร่วมกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อสร้างสรรค์เทคโนโลยีใหม่ ๆ [4]

เมืองการบินต้นแบบไม่ได้เป็นเพียงศูนย์กลางของการผลิตอุตสาหกรรมไฮเทคเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งรวมของบริษัทเทคโนโลยีชั้นนำ ที่ครอบคลุมตั้งแต่ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เทคโนโลยี 5G ระบบอัตโนมัติ (Automation) และการผลิตชิปเซมิคอนดักเตอร์ เทคโนโลยีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก กำลังพัฒนาไปในทิศทางเดียวกัน โดยตั้งอยู่ในเขตส่งเสริมอุตสาหกรรมและนวัตกรรมดิจิทัล (EECd) หรือ Digital Park Thailand ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลทุ่งสุลา อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี พื้นที่แห่งนี้เป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมดิจิทัลที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการลงทุนจากบริษัทเทคโนโลยีชั้นนำของโลก

Digital Park Thailand เป็นศูนย์กลางของการพัฒนาเทคโนโลยีดิจิทัลที่ครอบคลุมตั้งแต่ Big Data, Cloud Computing, Cybersecurity, Internet of Things (IoT) และเทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain) พื้นที่แห่งนี้ไม่เพียงแต่เป็นที่ตั้งของบริษัทเทคโนโลยีเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งของสตาร์ทอัพและนักพัฒนาเทคโนโลยี ที่สามารถทำงานร่วมกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อสร้างสรรค์นวัตกรรมใหม่ นอกจากนี้ เมืองการบินภาคตะวันออกยังมี ศูนย์นวัตกรรมดิจิทัลและเทคโนโลยีขั้นสูงบ้านฉาง ซึ่งกำลังได้รับการพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม 4.0 พื้นที่แห่งนี้จะเป็นที่รวมของนักวิจัย ผู้ประกอบการ และนักพัฒนาเทคโนโลยี ที่มุ่งเน้นการสร้างสรรค์เทคโนโลยีล้ำสมัย เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการบิน โลจิสติกส์ ยานยนต์ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมดิจิทัล [20, 21]

การพัฒนาทั้งเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกให้เป็นศูนย์กลางของเทคโนโลยีและนวัตกรรม ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศเท่านั้น แต่ยังช่วยดึงดูดนักลงทุนจากทั่วโลกให้เข้ามาใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง และยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ประเทศไทยก้าวขึ้นเป็นศูนย์กลางเทคโนโลยีระดับโลกในอนาคต

8. พื้นที่สำหรับการศึกษา เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก ในยุคที่เทคโนโลยีกลายเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกกำลังถูกพัฒนาให้เป็นศูนย์กลางนวัตกรรมระดับโลก โดยได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงและการวิจัยด้านดิจิทัล ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของประเทศ [4, 21]

เมืองการบินต้นแบบ ตั้งอยู่ใน Zhengzhou National High & New Technology Industries Development Zone ซึ่งเป็นหนึ่งในเขตพัฒนาอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงของจีน พื้นที่นี้ถูกออกแบบให้เป็น ศูนย์กลางเทคโนโลยีระดับชาติ ที่รวบรวมห้องปฏิบัติการวิจัย ศูนย์พัฒนานวัตกรรม และบริษัทเทคโนโลยีชั้นนำที่มุ่งเน้นการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ล้ำสมัย นอกจากนี้ยังมี Hi-tech Industrial Park ซึ่งเป็นเขตอุตสาหกรรมไฮเทคที่เปิดโอกาสให้นักวิจัยและนักพัฒนาเทคโนโลยีสามารถทำงานร่วมกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อสร้างสรรค์เทคโนโลยีใหม่ ๆ [4]

9. พื้นที่เพื่อสุขภาพ ศูนย์กลางแห่งสุขภาพและนวัตกรรมทางการแพทย์ ในยุคที่การแพทย์และเทคโนโลยีสุขภาพมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพชีวิตของผู้คน เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกต่างให้ความสำคัญกับการพัฒนาพื้นที่เพื่อสุขภาพ โดยมุ่งเน้นไปที่การวิจัย การผลิตเวชภัณฑ์ และการพัฒนานวัตกรรมทางการแพทย์ เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศในด้านอุตสาหกรรมการแพทย์และชีวเวชศาสตร์

เมืองการบินต้นแบบ ได้พัฒนา Zhengzhou Biomedical Industrial Park ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางของ อุตสาหกรรมชีวเวชภัณฑ์และเทคโนโลยีทางการแพทย์ โดยมุ่งเน้นไปที่การวิจัยและผลิตเวชภัณฑ์ที่ทันสมัย อุทยานอุตสาหกรรมชีวเวชศาสตร์แห่งนี้ได้กลายเป็นแหล่งรวมของบริษัทด้านชีวเวชภัณฑ์ชั้นนำของจีน รวมถึงสถาบันวิจัยที่พัฒนาเทคโนโลยีการรักษาโรคที่ทันสมัย เช่น การพัฒนายารักษามะเร็ง เทคโนโลยีการแพทย์ฟื้นฟู และการผลิตวัคซีนชีวภาพ พื้นที่แห่งนี้ได้รับการออกแบบให้เป็นระบบนิเวศที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีชีวเวชศาสตร์แบบครบวงจร ตั้งแต่การวิจัยพื้นฐานไปจนถึงการผลิตเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังมีความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยชั้นนำและสถาบันวิจัยจากทั่วโลก เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

ในขณะที่ เมืองการบินภาคตะวันออก ได้พัฒนา เขตส่งเสริมเศรษฐกิจพิเศษการแพทย์ครบวงจร (EECmd) ซึ่งเป็นโครงการสำคัญที่ได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ โดยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาศูนย์กลางทางการแพทย์ที่ครอบคลุม ตั้งแต่ การวิจัยและพัฒนา เทคโนโลยีทางการแพทย์ การผลิตอุปกรณ์และเวชภัณฑ์ ไปจนถึงการให้บริการทางการแพทย์ขั้นสูง

พื้นที่แห่งนี้ตั้งอยู่ที่ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์พัทยา ในตำบลโป่ง อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นทำเลที่เอื้อต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพ เขตเศรษฐกิจพิเศษแห่งนี้ได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางของ นวัตกรรมทางการแพทย์ขั้นสูง โดยมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางการแพทย์ เช่น การรักษาด้วยเซลล์ต้นกำเนิด (Stem Cell Therapy) การแพทย์แม่นยำ (Precision Medicine) เทคโนโลยีการตรวจวินิจฉัยโรคแบบดิจิทัล (Digital Diagnostics) และการผลิตยาและวัคซีนที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง อีกทั้ง เขต EECmd ยังได้รับความร่วมมือจากมหาวิทยาลัยชั้นนำและสถาบันวิจัยทางการแพทย์ระดับโลก เพื่อพัฒนางานวิจัยและสร้างนวัตกรรมที่สามารถนำไปใช้ได้จริง โดยมีเป้าหมายให้พื้นที่แห่งนี้กลายเป็น Medical Hub ที่สามารถรองรับทั้งนักลงทุนด้านการแพทย์ แพทย์ผู้เชี่ยวชาญ นักวิจัย และผู้ป่วยที่ต้องการเข้ารับการรักษาด้วยเทคโนโลยีที่ล้ำสมัย [2]

ด้วยการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสุขภาพของทั้งเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออก ทำให้สองพื้นที่นี้ไม่ได้เป็นเพียงแค่ ศูนย์กลางอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีเท่านั้น แต่ยังเป็น ศูนย์กลางแห่งสุขภาพและการแพทย์ยุคใหม่ ที่สามารถรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมการแพทย์ระดับโลก ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างศักยภาพของประเทศให้ก้าวขึ้นมาเป็นผู้นำในด้านการแพทย์และสุขภาพในอนาคต

6. สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบใน 9 ด้าน ได้แก่ การเชื่อมต่อสนามบิน พื้นที่ซ่อมบำรุงอากาศยาน พื้นที่อุตสาหกรรม ศูนย์ขนส่งและโลจิสติกส์ พื้นที่ธุรกิจ พื้นที่อยู่อาศัย กิจกรรมด้านเทคโนโลยี พื้นที่ศึกษา และพื้นที่สุขภาพ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. ด้านการเชื่อมโยงสนามบินกับพื้นที่โดยรอบ ทั้งเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านคมนาคมที่ครอบคลุมทุกเส้นทาง ไม่ว่าจะเป็นทางบก ทางราง ทางน้ำ และทางอากาศ เพื่อเชื่อมโยงสนามบินกับพื้นที่สำคัญ ได้แก่ เขตที่อยู่อาศัย พื้นที่ธุรกิจ พื้นที่อุตสาหกรรม และแหล่งท่องเที่ยว การพัฒนานี้ช่วยอำนวยความสะดวกในการเดินทางและขนส่งสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ด้านพื้นที่สำหรับการซ่อมบำรุงอากาศยาน ทั้งสองเมืองมีการจัดสรรพื้นที่ภายในสนามบินเพื่อรองรับการซ่อมบำรุงอากาศยานและการผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน อย่างไรก็ตาม เมืองการบินต้นแบบมีศักยภาพที่สูงกว่าในด้านการผลิตและประกอบเครื่องบิน เนื่องจากมีความเชี่ยวชาญและเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ากว่า

3. ด้านพื้นที่สำหรับการทำอุตสาหกรรม ทั้งสองเมืองมีการจัดสรรพื้นที่สำหรับอุตสาหกรรมการผลิต โดยเมืองการบินต้นแบบมี "เขตพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีเชิงใจ" ซึ่งมุ่งเน้นอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง ขณะที่เมืองการบินภาคตะวันออกมี "เขตส่งเสริมเศรษฐกิจพิเศษ" เพื่อรองรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย ซึ่งช่วยส่งเสริมการลงทุนและการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม

4. ด้านศูนย์ธุรกิจขนส่งและโลจิสติกส์ ทั้งสองเมืองได้รับการออกแบบให้เป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์ที่สำคัญ โดยมีโครงสร้างพื้นฐานรองรับการขนส่งสินค้าทางราง ถนน น้ำ และอากาศ เพื่อลดต้นทุนด้านโลจิสติกส์และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก

5. ด้านพื้นที่ธุรกิจ ในด้านธุรกิจ เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกมีการพัฒนา ศูนย์กลางธุรกิจ (Central Business District: CBD) ซึ่งเป็นที่ตั้งของอาคารสำนักงาน สถาบันการเงิน ศูนย์การค้า และโรงแรมระดับนานาชาติ เพื่อรองรับนักลงทุนและนักเดินทางจากทั่วโลก

6. ด้านพื้นที่เพื่อการอยู่อาศัย การพัฒนาเมืองการบินไม่ได้มุ่งเน้นแค่โครงสร้างทางเศรษฐกิจ แต่ยังให้ความสำคัญกับคุณภาพชีวิตของประชาชน ทั้งสองเมืองมีระบบสาธารณูปโภคครบครัน ไม่ว่าจะเป็นระบบน้ำ ไฟฟ้า พลังงาน และระบบขนส่งมวลชน เพื่อรองรับการเติบโตของประชากรและอำนวยความสะดวกให้กับผู้อยู่อาศัย

7. ด้านพื้นที่สำหรับกิจกรรมด้านเทคโนโลยี ทั้งสองเมืองมีการจัดสรรพื้นที่สำหรับ การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมยุคใหม่ ซึ่งรวมถึงเทคโนโลยีด้านการบิน โลจิสติกส์ และอุตสาหกรรมดิจิทัล เมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกมีแนวทางพัฒนาในทิศทางเดียวกัน โดยให้ความสำคัญกับโครงสร้างพื้นฐาน การเชื่อมโยงคมนาคม การพัฒนาอุตสาหกรรม และการลงทุนด้านนวัตกรรม อย่างไรก็ตาม เมืองการบินต้นแบบมีความได้เปรียบในด้านเทคโนโลยีการผลิตอากาศยานและชีวการแพทย์ ในขณะที่เมืองการบินภาคตะวันออกเน้นการส่งเสริมอุตสาหกรรมเป้าหมายผ่านเขตเศรษฐกิจพิเศษ

8. ด้านพื้นที่สำหรับการศึกษา ทั้งเมืองการบินต้นแบบและเมืองการบินภาคตะวันออกมีการพัฒนาระบบการศึกษา โดยมุ่งเน้นการสร้างบุคลากรที่มีความรู้และทักษะตรงกับความต้องการของอุตสาหกรรมการบิน ผ่านความร่วมมือกับสถาบันการศึกษาชั้นนำ

9. ด้านพื้นที่เพื่อสุขภาพ ด้านสุขภาพ เมืองการบินต้นแบบมีการจัดตั้งพื้นที่สำหรับ การผลิตชีวการแพทย์และวัคซีน ขณะที่เมืองการบินภาคตะวันออกมุ่งเน้นการพัฒนา ศูนย์การแพทย์เพื่อการวิจัยและพัฒนา ซึ่งช่วยยกระดับอุตสาหกรรมการแพทย์และสร้างความมั่นคงด้านสุขภาพ

การพัฒนาเมืองการบินอย่างครบวงจรเช่นนี้ จะช่วยเสริมสร้างศักยภาพทางเศรษฐกิจ เพิ่มขีดความสามารถของอุตสาหกรรมการบิน และส่งเสริมการลงทุนจากทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของภูมิภาคให้เติบโตอย่างมั่นคงและยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

1. การค้นคว้าอิสระครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างเฉพาะด้านกายภาพของเมืองการบินทั้งสองแห่ง ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปอาจมีการศึกษาเปรียบเทียบในด้านอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ด้านการบริหารจัดการ ด้านการพัฒนาพื้นที่

2. การศึกษาครั้งนี้ได้นำโมเดลของเมืองการบินเจ้โจวมาเป็นต้นแบบในการพัฒนาเมืองการบินภาคตะวันออก ซึ่งรูปแบบดังกล่าวได้รับการประยุกต์ใช้ในหลายประเทศ ไม่เพียงแต่เฉพาะประเทศไทย ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปอาจเป็นการศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินเจ้โจวกับเมืองการบินในประเทศอื่นๆ เช่น สนามบินอัมสเตอร์ดัมสคิปโฮลของเนเธอร์แลนด์ สนามบินปารีส-ชาร์ล เดอ โกล ของฝรั่งเศส เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระเรื่อง “การศึกษาเปรียบเทียบเมืองการบินภาคตะวันออกของประเทศไทยกับเมืองการบินต้นแบบ” สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.นปภา ภทรกมลพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และอาจารย์ ดร. คงศักดิ์ ขมขุม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้าอิสระนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรการจัดการมหาบัณฑิตที่ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์มากมายแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หลักสูตรการจัดการมหาบัณฑิต และเจ้าหน้าที่สำนักงานบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในการประสานงานต่าง ๆ ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท MM AVM 9 ทุกคนที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือซึ่งกันและกัน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และ พี่สาวที่ให้อำนาจใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, “รายงานสภาวะอุตสาหกรรมการบินของประเทศไทย พ.ศ. 2561,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <https://www.caat.or.th/wp-content/uploads/2019/05/รายงานสภาวะอุตสาหกรรมการบินของประเทศไทย-พ.ศ.-2561-ฉบับปรับปรุง-ณ-วันที่-17-พฤษภาคม-2562.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, “แผนยุทธศาสตร์ประจำปี พ.ศ. 2560-2565,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/action%20plan/oie_strategy_2017_2021.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).
- [3] J. D. Kasarda and G. Lindsay, *Aerotropolis: The Way We'll Live Next*, New York: Macmillan, 2011.
- [4] J. D. Kasarda, “China’s Aerotropolis: The Zhengzhou Airport Economy Zone.” [Online]. Available: <https://www.internationalairportreview.com/whitepaper/73497/chinas-aerotropolis-airport-economy/>. (Accessed: January. 2, 2024).

- [5] ลัฐกา เนตรทัศน์, “การส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการบินของอาเซียน,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: https://www.lawforasean.krisdika.go.th/File/files/Article_May2_AviationHub.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).
- [6] R. Banai, “The aerotropolis: Urban sustainability perspectives from the regional city,” *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 10, no. 1, pp. 357-373, December 2016.
- [7] J. D. Kasarda and S. J. Appold, “Planning a competitive aerotropolis,” *The Economics of International Airline Transport*, vol. 4, pp. 281-308, August 2014.
- [8] B. Huo and M. Guo, “How does an aerotropolis integrate? A case from Zhengzhou Airport Economy Zone,” *MDPI- Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol 5, no. 2, pp. 1-16, May 2021.
- [9] S. J. Appold and J. D. Kasarda, “The airport city phenomenon: evidence from large US airports,” *Urban Studies*, vol. 50, no. 6, pp. 1239–1259, May 2013.
- [10] P. Pujinda, “The Competitiveness of Airport Regions in Southeast Asia: The Lesson from Two Arch Rivals in Europe,” *Journal of Environmental Design and Planning*, vol 2, no. 1, pp. 69-80, January 2007.
- [11] C. Bejrananda, “From Runway to Cityscape: Challenges of Airport-Driven Urban Growth,” *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 1-10, December 2024.
- [12] พนิดา งามจรัสศรีวิชัย และ กมลพร กัลยาณมิตร, “การนำโครงการพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ไปปฏิบัติ,” *วารสารวิชาการ สถาบันวิทยาการจัดการแห่งแปซิฟิก*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, หน้า 323-333, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2563.
- [13] นพดล วิทยาภรณ์ และ เอกพร รักความสุข, “การบริหารการพัฒนาโครงการพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษ ศึกษากรณี: พื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก EEC,” *วารสารมหาวิทยาลัยวิชาการ*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, หน้า 95-109, กรกฎาคม-ธันวาคม, 2562.
- [14] G. A. Bowen, “Document analysis as a qualitative research method,” *Qualitative Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 27–40, August 2009.
- [15] T. L. Wheelen, J. D. Hunger, A. N. Hoffman and C. E. Bamford, *Strategic Management and Business Policy*, London: Pearson, 2017.
- [16] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.), “แผนปฏิบัติการโครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษ ภาคตะวันออก พ.ศ. 2566-2570,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <https://www.eeco.or.th/web-upload/filecenter/eec-development-plan/plan.pdf> (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).
- [17] ไทยพับลิก้า, “เปิดสัมปทาน ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยาน” มิ.ย. 65 ยก “อู่ตะเภา” สู่มหานครการบินครบวงจร,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <https://thaipublica.org/2021/12/u-tapao-aviation-technical-zone/> (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).

- [18] จันทร์จิรา ปาโท และ ญาเรศ อัครพัฒนานุกูล, “6 อุตสาหกรรมหลัก เป้าหมายการพัฒนาเขตนวัตกรรมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EECi),” *Journal of Modern Learning Development*, ปีที่ 7 ฉบับที่ 6, หน้า 377-393, กรกฎาคม, 2565.
- [19] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.), “แผนปฏิบัติการด้านโครงสร้างพื้นฐานศูนย์ธุรกิจ EEC และเมืองใหม่ท่าอากาศยาน,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <https://www.eeco.or.th/web-upload/filecenter/eec-new-city/eec-new-city-004.pdf> (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).
- [20] ทรรธร ณรงค์, วิจิตรา ศรีสอน และ สันฐาน ชยนนท์, “ยุทธศาสตร์การพัฒนาระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC),” *วารสารสันติศึกษาปริทรรศน์ มจร*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 3, หน้า 1256-1267, พฤษภาคม, 2022
- [21] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.), “แผนปฏิบัติการการพัฒนาบุคลากร การศึกษา การวิจัย และเทคโนโลยี รองรับการพัฒนาเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก,” [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <https://www.eeco.or.th/web-upload/filecenter/untitled%20folder/EEC013.pdf> (เข้าถึงเมื่อ: 2 มกราคม 2567).

การปรับปรุงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บบเพื่อเสริมศักยภาพอย่างยั่งยืนของ
วิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี
Improving the Production Process of Curry Puff Products to Enhance
the Sustainable Potential of Mae Baan Tapon Noi Community Enterprise,
Khlung District, Chanthaburi Province

ปรัชพรณ์ เศรษฐเสถียร^{1*}, เบญจมาศ เนติวรรักษา², กฤติยาภรณ์ คุณสุข³ และ พงศธร จันทรตรี⁴

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

²สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและการจัดการคุณภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Pratchaporn Setsathien^{1*}, Benjamas Netiworaruksa²,

Kritiyaporn Kunsook³ and Pongsaton Chantri⁴

¹Logistics Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

²Engineering Program in Production Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

³Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

⁴Civil Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi

pratchaporn.s@rbru.ac.th

Received 08 January 2025

Revised 17 April 2025

Accepted 28 April 2025

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บบของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี ด้วยแผนผังก้างปลา พบว่า สาเหตุหลัก คือ เมื่อจำหน่ายกะหรี่ปั๊บบแล้วผลิตภัณฑ์ไม่กรอบ รวมถึงเกิดการรอคอยเป็นเวลานานเกินไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิต และปรับปรุงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บบ จากการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิกระบวนการไหล พบว่า ใช้เวลาทั้งหมด 14 ชั่วโมง 15 นาที ได้จำนวน 30 ชิ้น จากนั้นปรับปรุงกระบวนการ โดยหลักการ ECRS ในขั้นตอนการเตรียมไส้ พบว่า สามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 72.30 ของเวลาทั้งหมดในขั้นตอนการเตรียมไส้ โดยการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) กระบวนการผลิตแบบทอด 2 ครั้ง และ 2) กระบวนการผลิตแบบอบ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวิธีการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ผลพบว่าความชอบโดยรวม กระบวนการผลิตแบบทอด 2 ครั้ง ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุด โดยมีคะแนนเฉลี่ย 7.15 การประเมินหาค่าความชื้นของกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม แบบทอด 2 ครั้ง และแบบอบ อยู่ที่ 13.97 13.10 และ 12.70 ตามลำดับ และการประเมินหาค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ของกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม แบบทอด 2 ครั้ง และแบบอบ อยู่ที่ 0.787

0.811 และ 0.775 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบการทอด 2 ครั้งมาใช้สำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊

คำสำคัญ: กระบวนการผลิต, ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊, วิสาหกิจชุมชน, ECRS

Abstract

The analysis of the curry puff production process of Mae Baan Tapon Noi Community Enterprise, Khlung District, Chanthaburi Province, using a fishbone diagram found that the main causes were that when the curry puffs were sold, the products were not crispy and there was an excessive waiting time. Therefore, the objective of this research was to study and improve the curry puff production process. From the study and analysis of the production process using a process flow diagram, it was found that it took a total of 14 hours and 15 minutes to produce 30 pieces. Improvements were made based on the ECRS principle, focusing particularly on the filling preparation stage. As a result, the time required for this stage was reduced by 72.30% of the original duration. The production process was revised and divided into two steps: 1) the twice-frying process and 2) the baking process. These two methods were evaluated through sensory quality evaluation method. The results showed that the twice-frying process received the highest overall preference, with an average score of 7.15. The moisture values of the traditional, twice-frying, and baked processes were 13.97, 13.10, and 12.70, respectively. The water activity values of the traditional, twice-frying, and baked processes were 0.787, 0.811, and 0.775, respectively. Therefore, the twice-frying process was selected for the curry puff product manufacturing process.

Keywords: Production Process, Curry Puff Product, Community Enterprise, ECRS

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ [1] เป็นอาหารแบบตะวันตกผสมกับอินเดีย ได้รับความนิยมจากชาวมุสลิมในประเทศไทย สันนิษฐานว่าดัดแปลงมาจากขนมโปรตุเกสคือ ปัสเตล โดยท้าวทองกีบม้าได้นำมาเผยแพร่ในราชสำนัก ตั้งแต่สมัยอยุธยาตอนกลาง ทำให้กะหรี่ปั๊มีความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะร้านขายของฝาก ของที่ระลึกต่าง ๆ อีกด้วย

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อยได้รวมตัวกันเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ชุมชนออกจัดจำหน่าย โดยสินค้าชุมชนมีความหลากหลาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ชุมชนแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ งานฝีมือ ได้แก่ ตะกร้าหวาย เป็นต้น และงานแปรรูป สินค้าทางการเกษตรจากผลไม้ท้องถิ่นในชุมชน ได้แก่ น้ำจิ้มสุกี้รสผลไม้จากมะละกอ ลองกอง สับปะรด มังคุด เป็นต้น รวมถึงงานอาหารแปรรูปจากอาหารพื้นบ้านของจังหวัดจันทบุรี ได้แก่ น้ำพริกผงชะมวง หมูชะมวงเส้น แคบหมูรสหมูชะมวง เห็ดรสหมูชะมวง เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ไส้หมูชะมวง ซึ่งปกติในการจัดจำหน่ายกะหรี่ปั๊

ของวิสาหกิจชุมชนจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 คือ การจัดจำหน่ายในงานแสดงสินค้าต่าง ๆ เช่น งานแสดงสินค้า OTOP Midyear 2023 “ที่สุดแห่งภูมิปัญญา รังสรรค์จากการพัฒนา เพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจไทย” ซึ่งเป็นงานแสดงสินค้าหนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์ ทางวิสาหกิจชุมชนต้องนำวัตถุดิบไปเริ่มผลิตในงานแสดงสินค้าใช้เวลาเตรียมวัตถุดิบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงถึงจะสามารถขายได้ ซึ่งทางวิสาหกิจชุมชนต้องการแก้ปัญหา คือ ลดเวลาในการเตรียมผลิตภัณฑ์เพื่อขายให้ได้ปริมาณมากขึ้น และรูปแบบในการจัดจำหน่ายรูปแบบที่ 2 คือ การขายส่งออนไลน์ แต่พบปัญหาเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาสั้น ไปถึงมือผู้บริโภคแล้วมีเนื้อสัมผัส กลิ่นที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ทำสดใหม่ ส่งผลให้ทางกลุ่มวิสาหกิจหยุดจัดจำหน่ายเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการผลิตกะหรีบไส้หมูชะมวงในวิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย เนื่องจากกะหรีบไส้หมูชะมวงเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ทางชุมชนให้ความสำคัญในการพัฒนา โดยศึกษาอุณหภูมิ เวลาในการอบและทอด [2] เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางการตลาดและการพัฒนาเป็นชุมชนที่ยั่งยืนต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตด้านพื้นที่ประชากร ได้แก่ วิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย และขอบเขตด้านเนื้อหาในการทำการศึกษ ได้แก่ การปรับปรุงกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์กะหรีบไส้หมูชะมวง โดยใช้เครื่องมือในการจัดการ ได้แก่ ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) หลักการ ECRS เป็นต้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart)

แผนภูมิที่แสดงถึงการเคลื่อนย้ายตามลำดับก่อนหลัง หรือแสดงแนวทางการทำงานของผลิตภัณฑ์เป็นแผนที่บอกถึงรายละเอียดของการปฏิบัติงาน เนื่องจากแผนภูมินี้เน้นที่การเคลื่อนที่ ดังนั้นการวิเคราะห์แผนภูมินี้จะทำได้ดีก็ต่อเมื่อมีการกำหนดผังของการเคลื่อนที่แล้ว [3, 4]

การวิเคราะห์ขั้นตอนการไหลของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน พลังงานและอุปกรณ์ ที่เคลื่อนไปในกระบวนการพร้อมกับกิจกรรมต่าง ๆ การใช้สัญลักษณ์ในแผนภูมิถูกกำหนดโดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลของอเมริกา (The American Society of Mechanical Engineers, ASME) โดยแบ่งกิจกรรมในวิธีการทำงานออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ คือ

1) การปฏิบัติงานหรือการทำงาน (Operation) หมายถึง กิจกรรมที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงอย่างจงใจไม่ว่าจะเป็นทางกายภาพหรือทางเคมีกิจกรรมที่แยกหรือประกอบกิจกรรมที่จัด และเตรียมวัสดุสำหรับขั้นตอนในการผลิต รวมถึงการรับส่งข่าวสารการคำนวณและการวางแผน

2) การขนส่งหรือการขนย้าย (Transportation) หมายถึง กิจกรรมที่ทำให้วัสดุเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง ยกเว้นการเคลื่อนย้ายขณะอยู่ในขั้นตอนการผลิต และยกเว้นกรณีที่เป็นการเคลื่อนย้ายโดยการขนย้ายงานภายในสถานงานระหว่างการตรวจสอบ

3) การตรวจสอบ (Inspections) หมายถึง กิจกรรมเกี่ยวกับการตรวจสอบเปรียบเทียบชนิด คุณภาพ ปริมาณของวัสดุ

4) การรอคอย (Delays) หมายถึง กิจกรรมที่มีการหยุดหรือพักก่อนที่จะมีการทำงานขั้นตอนต่อไป

5) การพัก (Storages) หมายถึง กิจกรรมที่วัสดุถูกเก็บพักหรือถูกควบคุมไว้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ถ้ามีความต้องการ

3.2 ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) หรือเรียกชื่อว่าแผนผังอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) หมายถึง แผนผังที่ใช้ในการวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน ส่งผลให้ผลปรากฏตามมาในขั้นตอนสุดท้าย

แผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่มีความเป็นไปได้ที่ก่อให้เกิดปัญหา (Possible Cause) แผนภูมิมียุทธศาสตร์คล้ายปลาที่เหลือแต่ก้าง ซึ่งเป็นการระดมความคิดอย่างเป็นอิสระของทุกคนในกลุ่ม ได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดยศาสตราจารย์ คาโอรุ อิชิกาวะ จากมหาวิทยาลัยโตเกียว การวิเคราะห์แผนผังก้างปลานั้น เป็นการช่วยให้เข้าใจสาเหตุของปัญหา และอาการที่แสดงออกมาจากต้นเหตุนั้น แสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่แตกต่างกันระหว่างสิ่งที่เกิดก่อนหน้าของปัญหาและผลกระทบที่ระบุไว้ เครื่องมือนี้ใช้เมื่อปัญหาที่เกิดขึ้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยเกินไป จึงจำเป็นต้องหาสาเหตุของปัญหาที่แท้จริงจากสาเหตุที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป [5]

สาเหตุในการใช้แผนผังก้างปลา

- 1) เมื่อต้องการค้นหาสาเหตุของปัญหา ซึ่งปัญหาหนึ่งอาจมีปัจจัยหรือสาเหตุที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย
- 2) เมื่อต้องการทำการศึกษา ทำความเข้าใจ หรือทำความรู้จักกับกระบวนการอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่พนักงานจะรู้ปัญหาเฉพาะในพื้นที่ของตนเท่านั้น แต่เมื่อมีการทำผังก้างปลาแล้ว ทำให้สามารถรู้และเข้าใจกระบวนการของแผนกอื่นมากขึ้น
- 3) เมื่อต้องการให้เป็นแนวทางในการรวบรวมความคิด เพื่อให้ระดมความคิดหาสาเหตุของปัญหาจากการระบุไว้ที่หัวปลา

วิธีการสร้างผังก้างปลา ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1) กำหนดหรือเขียนปัญหาที่หัวปลาทางด้านขวา ควรกำหนดให้ชัดเจน มีความเป็นไปได้ ซึ่งถ้าทำการกำหนดประโยคปัญหานี้ไม่ชัดเจนตั้งแต่แรก จะส่งผลให้ต้องใช้เวลามากในการค้นหาสาเหตุ

3.2) กำหนดหรือเขียนสาเหตุหรือปัจจัยหลัก ๆ ซึ่งอาจมีหลายสาเหตุไว้ที่ปลายก้างปลาแต่ละก้าง โดยสาเหตุหรือปัจจัยนั้น สามารถแยกแยะและกำหนดสาเหตุต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบและเป็นเหตุเป็นผล ซึ่งสาเหตุหรือปัจจัยหลัก ๆ อาจเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับบริบทของปัญหา เช่น 4M1E ซึ่งประกอบด้วย

M Man ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับบุคลากร เช่น ทักษะ ความรู้ ประสบการณ์ แรงจูงใจ และประสิทธิภาพในการทำงาน

M Machine ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร อุปกรณ์ และเทคโนโลยี เช่น ประสิทธิภาพ ความแม่นยำ ความเสถียร และการบำรุงรักษา

M Material ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ วัตถุดิบ และส่วนประกอบ เช่น คุณภาพ ความสม่ำเสมอ และความพร้อมใช้งาน

M Method ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำงาน ขั้นตอน และวิธีการปฏิบัติ เช่น ความถูกต้อง ความเหมาะสม และประสิทธิภาพ

E Environment ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมในการทำงาน เช่น สถานที่ อุณหภูมิ แสงสว่าง และบรรยากาศ

การใช้หลักการ 4M1E เป็นกรอบในการกำหนดกลุ่มปัจจัย ช่วยให้มั่นใจได้ว่า การวิเคราะห์สาเหตุจะครอบคลุมทุกมิติที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามในบางกรณีจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมกลุ่มปัจจัยให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของปัญหาและบริบทของการวิเคราะห์

3.3) เขียนสาเหตุย่อยต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบในแต่ละสาเหตุหรือปัจจัยหลักไว้ที่ก้างปลาย่อย ถ้าหากมีสาเหตุย่อย ๆ เพิ่มขึ้น จะเขียนไว้ที่ก้างปลาย่อยที่เกี่ยวข้อง โดยอาจใช้คำถามทำไม หลาย ๆ ครั้ง ในการเขียน แต่ละก้างปลาย่อย

3.4) เมื่อสิ้นสุดคำถามแล้ว จึงพิจารณาไปที่ก้างต่อ ๆ ไป จนกว่าจะได้ผังก้างปลาที่สมบูรณ์

3.5) เมื่อทำผังก้างปลาเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะนำผังก้างปลาไปใช้ประโยชน์ต่อไป ควรตรวจสอบว่า การเขียนเหตุผลบนผังมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยให้ทดลองอ่านจากก้างที่เล็กที่สุดไปยังก้างที่ใหญ่ที่สุด จนกระทั่งถึงหัวปลา

3.3 การลดความสูญเสียเปล่าด้วยหลักการ ECRS

ในกระบวนการทำงานมักมีความสูญเสียเปล่าแอบแฝงเกิดขึ้นในแต่ละกิจกรรมอยู่เสมอ หลักการ ECRS เป็น หลักการง่าย ๆ ที่สามารถใช้ในการลดความสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่าง ๆ ได้ ประกอบด้วย 4 หลักการ ดังนี้ [6]

1) การขจัดงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate) หมายถึง ความสูญเสียของแรงงาน เวลา วัสดุสิ่งของหรือเงินทุน ค่าใช้จ่ายที่นำมาลงทุนหรือดำเนินกิจการหรือจัดงานนั้นขึ้น เป็นการตัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นในกระบวนการ ออกไป

2) การรวมขั้นตอนการปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน (Combine) ในกระบวนการผลิต เพื่อประหยัดเวลาหรือ แรงงานในการทำงาน ถ้าแบ่งขั้นตอนการผลิตหรือปฏิบัติงานมากเกินไป ทำให้มีการใช้อุปกรณ์เครื่องมือ หรือการเคลื่อนย้ายวัสดุมากเกินไปจนความจำเป็น ส่งผลให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เช่น เสียสมดุลในระบบสายการผลิต การทำงานเกิดความล่าช้า เกิดการรอคอยของงาน จึงจำเป็นต้องหาทางรวมขั้นตอนหรือส่วนของงานที่จำเป็นนั้นเข้าด้วยกัน ดังนั้นจึงเป็นหลักการของการรวมงานเกิดขึ้นเพื่อลดการทำงานที่ซับซ้อน และลดการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็น

3) การปรับเปลี่ยนลำดับการปฏิบัติงาน (Rearrange) หรือการจัดขั้นตอนการทำงานใหม่ในการผลิต สินค้าใหม่ ส่วนใหญ่เริ่มต้นผลิตจำนวนน้อยก่อนเพราะเป็นขั้นตอนทดลอง แต่เมื่อขยายกำลังการผลิต ส่งผลให้ปริมาณ การผลิตเพิ่มขึ้นทีละน้อย แต่หากลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานยังคงเหมือนเดิม มักเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหา ในเรื่องของการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบ และการไหลของงาน เนื่องจากจำนวนของชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงจำเป็นต้องจัดลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ โดยมีการตรวจสอบขั้นตอนการปฏิบัติงานด้วยวิธีตั้งคำถาม อย่างละเอียด เพื่อตรวจสอบว่าสามารถสลับลำดับขั้นตอนการทำงานใหม่ได้หรือไม่ที่ทำให้การปฏิบัติงานนั้นง่ายขึ้น

4) การทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) พิจารณาปรับปรุงการทำงานให้ง่ายและสะดวกขึ้น ลดเวลา หรือลดงานย่อยลง และมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม เช่น การสร้างอุปกรณ์เสริมช่วยในการทำงาน งานที่มีขั้นตอน ยุ่งยากซับซ้อนใช้แรงงานมาก จำเป็นต้องหาเครื่องมือที่ช่วยผ่อนแรง เครื่องจักรที่ทันสมัยสามารถทำงานได้อย่าง รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ลงพื้นที่สอบถามข้อมูลเบื้องต้น

ผู้วิจัยทำการลงพื้นที่เพื่อศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บน้ำมะขาม กลุ่มวิสาหกิจชุมชน แม่บ้านตะปอนน้อย อำเภอลำลูกเกด จังหวัดจันทบุรี โดยสังเกตการณ์และทำการสัมภาษณ์กลุ่มวิสาหกิจชุมชนแม่บ้าน ตะปอนน้อย เพื่อทราบสภาพปัจจุบัน ทำการสัมภาษณ์เชิงลึก เพื่อศึกษากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บน้ำมะขาม ทำการสัมภาษณ์กระบวนการผลิต เก็บข้อมูลขั้นตอนการทำงานและการสังเกตกระบวนการทำงาน

4.2 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

นำข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลมาวิเคราะห์หาปัญหาที่เกิดจากขั้นตอนการผลิต โดยใช้แผนภูมิแกงปลาหาสาเหตุแท้จริงในกระบวนการผลิต

4.3 เก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงาน

ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยสังเกตการทำงานของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อศึกษาขั้นตอนในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรีบัสั้หมูชะมวงและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลศึกษาตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์กะหรีบัสั้หมูชะมวง โดยบันทึกข้อมูลด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart)

4.4 ปรับปรุงกระบวนการผลิต

นำข้อมูลและขั้นตอนของการทำงาน ที่ได้จากการวิเคราะห์แล้วนำมาปรับปรุงขั้นตอนที่วางแผนไว้ โดยใช้หลักการ ECRS เพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตและการทำงาน แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate)
- 2) รวมขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนเข้าด้วยกัน (Combine)
- 3) ลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อให้สะดวกและรวดเร็ว (Rearrange)
- 4) ปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Simplify)

4.5 วัดผลหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต

นำตัวอย่างจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตมาวิเคราะห์การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส และวิเคราะห์การประเมินหาค่าวอเตอร์แอคทีวี่และความชื้นของผลิตภัณฑ์กะหรีบัสั้หมูชะมวง [7]

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

1) ทดสอบชิมตัวอย่างที่ใส่รหัสจากการสุ่มด้วยตัวเลขสามตัว จากซ้ายไปขวา เพื่อทำการประเมินลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ แล้วให้คะแนนความชอบตามลำดับคะแนนที่กำหนดไว้โดยใช้แบบทดสอบ 9-point hedonic scale มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 9 โดยคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด

2) นำผลที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาความแตกต่างของคะแนนความชอบของตัวอย่างที่ทดสอบ

การประเมินหาค่าวอเตอร์แอคทีวี่

- 1) นำตัวอย่างมาหั่นให้ละเอียด และผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) เปิดเครื่อง Water activity analyzer รุ่น Pre ก่อนใช้งานทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที
- 3) เทียบเครื่องมือวัด (Calibrate) โดยน้ำกลั่น ค่า Sensor Dew Point อยู่ในช่วง 0.990-1.010 a_w

การประเมินหาค่าความชื้น

- 1) นำตัวอย่างมาหั่นให้ละเอียด และผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) ใช้เครื่องอบไฟฟ้า (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นในโถความชื้นและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
- 3) อบซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง นำตัวอย่างมาคำนวณหาค่าความชื้น

การคำนวณ

ปริมาณความชื้น = $[(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100] / \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}$

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) = $100 - \text{ปริมาณความชื้นทั้งหมด}$

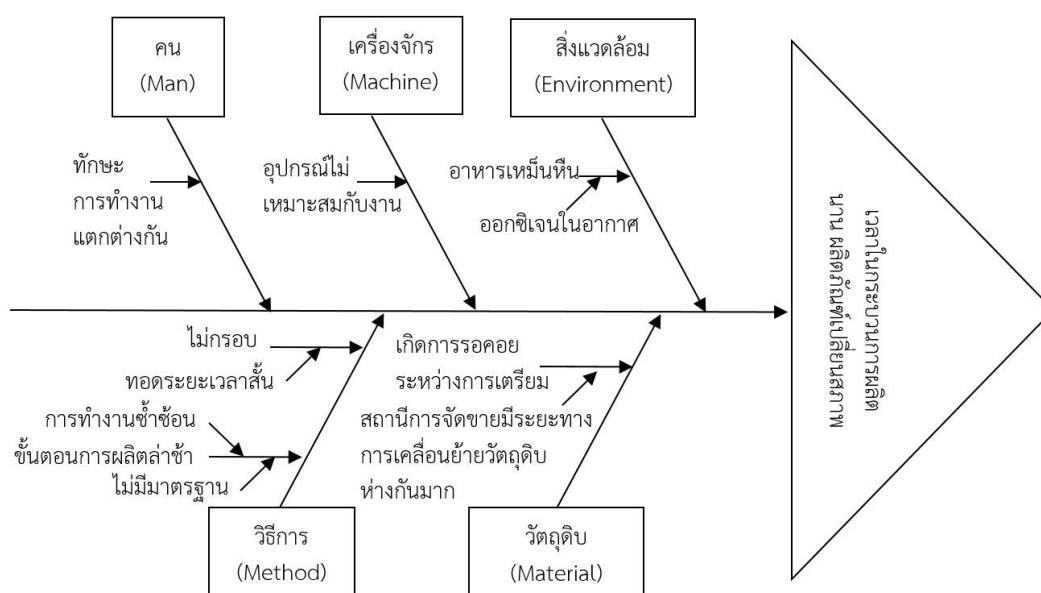
5. ผลการวิจัย

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปไส้หมูชะมวง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทางวิสาหกิจชุมชนได้ทำออกจำหน่าย ซึ่งจากสภาพปัจจุบัน สามารถสรุปสาเหตุของปัญหาได้ดังรูปที่ 1 แสดงแผนผังก้างปลาผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป

5.2 ผลการวิเคราะห์กระบวนการผลิต

จากการรวบรวมข้อมูลการทำผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป เพื่อนำมาวิเคราะห์ในกระบวนการผลิตโดยใช้ตารางแผนภูมิกระบวนการไหลในการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 1-4 ต่อไปนี้



รูปที่ 1 แสดงแผนผังก้างปลาผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป

ตารางที่ 1 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมไส้

แผนภูมิกระบวนการไหล	กิจกรรม	ปัจจุบัน
กิจกรรม : ขั้นตอนการเตรียมไส้	การดำเนินงาน	○
	การขนส่ง	⇒
	การรอคอย	□
	การตรวจสอบ	□
	การเก็บรักษา	▽
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน		-

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	เวลา (วินาที)					34,359				
		สัญญาณ									
		○	⇒	▽	□	▷					
1. ทำแกงหมูชะมวง	7,278	●	⇒	▽	□	▷					
2. พักไฉนเย็น	1,800	○	⇒	▽	□	▷					
3. แยกหมูออกจากน้ำแกงหมูชะมวง	652	●	⇒	▽	□	▷					
4. นำน้ำแกงหมูชะมวงไปพักเก็บไว้ในตู้เย็น	67	○	⇒	▽	□	▷					
5. นำหมูมาฉีกเป็นเส้นเล็ก ๆ	10,600	●	⇒	▽	□	▷					
6. ย้ายหมูไปที่เครื่องอบ	98	○	⇒	▽	□	▷					
7. นำหมูไปอบจนแห้ง	10,904	●	⇒	▽	□	▷					
8. นำหมูไปปั่นจนละเอียด	2,453	●	⇒	▽	□	▷					
9. นำน้ำแกงหมูชะมวงออกจากตู้เย็นเพื่อรอผสม	67	○	⇒	▽	□	▷					

ตารางที่ 1 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมไส้ (ต่อ)

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญญาณ				
		○	⇒	▽	□	▷
10. นำน้ำแกงหมูชะมวงใส่ภาชนะที่เตรียมไว้	45	●	⇒	▽	□	▷
11. เทหมูลงในน้ำแกงหมูชะมวง	23	●	⇒	▽	□	▷
12. คลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน	372	●	⇒	▽	□	▷

ตารางที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมแป้งชั้นนอก

แผนภูมิกระบวนการไหล		กิจกรรม		ปัจจุบัน	
กิจกรรม : ขั้นตอนการเตรียมแป้งชั้นนอก	การดำเนินงาน	○		13	
	การขนส่ง	⇒		11	
	การรอคอย	▷		8	
	การตรวจสอบ	□		-	
	การเก็บรักษา	▽		-	
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน		เวลา (วินาที)		3,742	

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญญาณ				
		○	⇒	▽	□	▷
1. ยกเครื่องชั่ง ถ้วย และวัตถุดิบแป้งชั้นนอกมาวางบนโต๊ะที่เตรียมไว้	183	○	⇒	▽	□	▷
2. ยกแป้งสาลีเนกประสงค์วางบนเครื่องชั่ง	6	○	⇒	▽	□	▷
3. ชั่งแป้งสาลีเนกประสงค์ 250 กรัม	28	●	⇒	▽	□	▷
4. ยกแป้งจากเครื่องชั่งมาวางบนโต๊ะ	6	○	⇒	▽	□	▷

5.วางแป้งพักไว้เพื่อซั้งวัตถุดิบอื่น	301	○	⇒	▽	□	●
6.ยกน้ำตาลวางบนเครื่องซั้ง	7	○	⇒	▽	□	○
7.ซั้งน้ำตาล 12 กรัม	15	●	⇒	▽	□	○
8.ยกน้ำตาลจากเครื่องซั้งมาวางบนโต๊ะ	7	○	⇒	▽	□	○
9.วางน้ำตาลพักไว้เพื่อซั้งวัตถุดิบอื่น	59	○	⇒	▽	□	●
10.ยกเกลือวางบนเครื่องซั้ง	9	○	⇒	▽	□	○
11.ซั้งเกลือ 3 กรัม	7	●	⇒	▽	□	○
12.ยกเกลือจากเครื่องซั้งมาวางบนโต๊ะ	9	○	⇒	▽	□	○
13.วางเกลือพักไว้เพื่อซั้งวัตถุดิบอื่น	44	○	⇒	▽	□	●
14.ยกน้ำตาลในสวบนเครื่องซั้ง	8	○	⇒	▽	□	○
15.ซั้งน้ำตาลในสว 125 กรัม	23	●	⇒	▽	□	○
16.ยกน้ำตาลในสวจากเครื่องซั้งมาวางบนโต๊ะ	8	○	⇒	▽	□	○
17.วางน้ำตาลในสวพักไว้เพื่อซั้งวัตถุดิบอื่น	15	○	⇒	▽	□	●
18.ยกน้ำมันรำข้าววางบนเครื่องซั้ง	11	○	⇒	▽	□	○
19.ซั้งน้ำมันรำข้าว 55 กรัม	10	●	⇒	▽	□	○
20.ยกน้ำมันรำข้าวจากเครื่องซั้งมาวางบนโต๊ะ	11	○	⇒	▽	□	○
21.วางน้ำมันรำข้าวพักไว้เพื่อรอผสมกับแป้ง	474	○	⇒	▽	□	●

ตารางที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมแป้งชั้นนอก (ต่อ)

คำอธิบาย	คำอธิบาย (วินาที)	สัญลักษณ์				
		○	⇒	▽	□	○
22.เทน้ำตาลกับเกลือผสมในน้ำตาลในสว	5	●	⇒	▽	□	○
23.กวนน้ำตาลกับเกลือจนละลายในน้ำตาลในสว	213	●	⇒	▽	□	○
24.พักส่วนผสมไว้เพื่อรอผสมกับแป้ง	162	○	⇒	▽	□	●
25.ร่อนแป้งใส่ภาชนะที่เตรียมไว้	157	●	⇒	▽	□	○
26.เทส่วนผสมใส่ลงในแป้ง(ที่ร่อนแล้ว)	32	●	⇒	▽	□	○
27.นวดแป้งกับส่วนผสมให้เข้ากัน	67	●	⇒	▽	□	○
28.ค่อย ๆ เทน้ำมันรำข้าวลงในแป้งทีละน้อยและนวดจนเป็นเนื้อเดียวกัน	344	●	⇒	▽	□	○
29.พักแป้งทิ้งไว้ 15 นาที โดยปิดด้วยฟิล์มถนอมอาหาร	900	○	⇒	▽	□	●
30.ตัดแป้งเป็นชิ้นและซั้งให้ได้ชิ้นละ 50 กรัม	367	●	⇒	▽	□	○
31.ปั้นแป้งให้เป็นทรงกลม	105	●	⇒	▽	□	○
32.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้และคลุมด้วยผ้าขาวบางไว้จนกว่าจะปั้นครบทุกชิ้น	149	○	⇒	▽	□	●

ตารางที่ 3 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมแป้งชั้นใน

แผนภูมิกระบวนการไหล	กิจกรรม	ปัจจุบัน
กิจกรรม : ขั้นตอนการเตรียมแป้งชั้นใน	การดำเนินงาน ○	5
	การขนส่ง ⇨	4
	การรอคอย □	2
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน	การตรวจสอบ □	-
	การเก็บรักษา ▽	-
	เวลา (วินาที)	902

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์				
		○	⇨	▽	□	▢
1. ยกแป้งสาลีเนกประสงค์วางบนเครื่องชั่ง	6	○	➡	▽	□	▢
2. ชั่งแป้งสาลีเนกประสงค์ 125 กรัม	25	●	⇨	▽	□	▢
3. ยกแป้งจากเครื่องชั่งมาวางบนโต๊ะ	6	○	➡	▽	□	▢
4. วางแป้งพักไว้เพื่อชั่งวัตถุดิบอื่น	33	○	⇨	▽	□	▢
5. ยกน้ำมันรำข้าววางบนเครื่องชั่ง	11	○	➡	▽	□	▢
6. ชั่งน้ำมันรำข้าว 55 กรัม	10	●	⇨	▽	□	▢
7. ยกน้ำมันรำข้าวลงจากเครื่องชั่งมาวางบนโต๊ะ	11	○	➡	▽	□	▢
8. นำน้ำมันรำข้าวเทลงในแป้งที่ละเอียดและนวดจนเป็นเนื้อเดียวกัน	320	●	⇨	▽	□	▢
9. ตัดแบ่งแป้งเป็นชิ้นและชั่งให้ได้ชิ้นละ 20 กรัม	339	●	⇨	▽	□	▢
10. ปั้นแป้งให้เป็นทรงกลม	105	●	⇨	▽	□	▢
11. วางแป้งพักไว้รอผสมกับแป้งชั้นนอก	36	○	⇨	▽	□	▢

ตารางที่ 4 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปและทอดผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊

แผนภูมิกระบวนการไหล	กิจกรรม	ปัจจุบัน
กิจกรรม : ขั้นตอนการขึ้นรูปและทอดผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊	การดำเนินงาน ○	16
	การขนส่ง ⇨	6
	การรอคอย □	6
	การตรวจสอบ □	-
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน	การเก็บรักษา ▽	-
	เวลา (วินาที)	12,266

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์				
		○	⇨	▽	□	▢
1. เตรียมแป้งชั้นนอกและแป้งชั้นในมาวางบนโต๊ะ	83	○	➡	▽	□	▢
2. นำแป้งชั้นนอก 1 ก้อน มาวางลงบนโต๊ะ	9	○	➡	▽	□	▢
3. กดแป้งชั้นนอกให้แบน	17	●	⇨	▽	□	▢

4.นำแป้งชั้นใน 1 ก้อน มาวางลงบนแป้งชั้นนอก ที่แบนแล้ว	11	●	⇒	▽	□	◻
5.หุ้มแป้งชั้นในด้วยแป้งชั้นนอก	34	●	⇒	▽	□	◻
6.คลึงแป้งเป็นก้อนกลม	32	●	⇒	▽	□	◻
7.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น	1,662	○	⇒	▽	□	◼
8.นำแป้ง 1 ก้อน มาวางลงบนโต๊ะ	10	○	➡	▽	□	◻
9.ใช้ไม้นวดรีดแป้งรอบที่ 1 เป็นแผ่นบาง ๆ โดยรีดขึ้นลง เท่านั้น	139	●	⇒	▽	□	◻
10.ม้วนแป้งเข้าหาตัว รอบที่ 1	28	●	⇒	▽	□	◻
11.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น	1,256	○	⇒	▽	□	◼
12.นำแป้งที่ม้วนเสร็จ 1 ม้วน มาวางลงบนโต๊ะ	14	●	⇒	▽	□	◻
13.รีดแป้งรอบที่ 2 เป็นแผ่นบาง ๆ โดยรีดขึ้นลงเท่านั้น	142	●	⇒	▽	□	◻
14.ม้วนแป้งเข้าหาตัว รอบที่ 2	25	●	⇒	▽	□	◻
15.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น	1,288	○	⇒	▽	□	◼
16.หยิบแป้งมา 1 ม้วนแล้ววางลงบนโต๊ะ	7	○	➡	▽	□	◻
17.ตัดแบ่งแป้งเป็น 3 ส่วน	61	●	⇒	▽	□	◻
18.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น	1,482	○	⇒	▽	□	◼
19.นำแป้งที่ตัดแล้วมา 1 ส่วนวางลงบนโต๊ะ โดยวางเป็น แนวตั้ง	9	●	⇒	▽	□	◻
20.รีดแป้งให้ออกเป็นแผ่น	22	●	⇒	▽	□	◻
21.นำแป้งขึ้นมาวางบนมือ	6	○	➡	▽	□	◻
22.ใส่ไส้หมูชะมวงประมาณ 1 ช้อนโต๊ะ	64	●	⇒	▽	□	◻

ตารางที่ 4 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปและทอดผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป (ต่อ)

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์				
		○	⇒	▽	□	◻
23.จับริมแป้งและพับจีบเข้าหากัน แล้วบีบริมแป้งให้ แน่น	109	●	⇒	▽	□	◻
24.วางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น	1,626	○	⇒	▽	□	◼
25.ขนย้ายกะหรี่ปั๊ปไปทอด	13	○	➡	▽	□	◻

26.ต้งน้ำมันให้ร้อน	395	●	⇒	▽	□	◇
27.นำกะหรี่ปั๊บลงไปทอด	1,242	●	⇒	▽	□	◇
28.วางพักเพื่อสะเด็ดน้ำมัน ไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ จนกว่าจะทอดครบทุกชิ้น	2,480	○	⇒	▽	□	●

ภาพรวมแผนภูมิกระบวนการไหลของการผลิตกะหรี่ปั๊บบ้างแบบดั้งเดิมรวมแล้ว ใช้เวลาทั้งหมด 51,269 วินาที หรือ 14 ชั่วโมง 15 นาที ได้ผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บก้อนจำนวน 30 ชิ้น

การจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนแม่บ้านตะปอนน้อย ช่องทางการจัดจำหน่ายมี 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คือ การจัดจำหน่ายในงานแสดงสินค้าต่าง ๆ และรูปแบบที่ 2 คือ การขายส่งออนไลน์ ซึ่งเกิดปัญหาในกระบวนการผลิตดังนี้

รูปแบบที่ 1 คือ สำหรับจัดจำหน่ายในงานแสดงสินค้า

ทางวิสาหกิจชุมชนจำเป็นต้องจัดเตรียมบางกระบวนการก่อน ได้แก่ กระบวนการทำไส้ ซึ่งใช้เวลา 34,359 วินาที แต่ขั้นตอนที่เหลือจึงนำไปเตรียมที่หน้างานแสดงสินค้า ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการเตรียมตั้งแต่กระบวนการทำแป้งชั้นนอก แป้งชั้นใน และกระบวนการทอด ทำให้ใช้เวลาในการเตรียมวัตถุดิบส่วนที่เหลือเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อที่จะคงความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป ส่งผลให้ต้องรอการผลิตก่อนจัดจำหน่ายเป็นเวลานาน นอกจากนี้ส่งผลทำให้สินค้าขายได้จำนวนไม่มาก เนื่องจากต้องเตรียมผลิตภัณฑ์พร้อมกับการจัดจำหน่าย

รูปแบบที่ 2 คือ สำหรับจัดจำหน่ายออนไลน์ พบปัญหาผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาสั้น เมื่อไปถึงมือผู้บริโภคแล้ว มีเนื้อสัมผัส กลิ่นที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ทำสดใหม่

5.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยหลักการ ECRC

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อสินค้าส่งถึงมือลูกค้า คือ ความกรอบลดลง มีน้ำมันออกมาจากผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากกว่าจะถึงมือผู้บริโภค ทำให้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสภาพต่างไปจากเดิม การปรับปรุงกระบวนการใหม่ ดังนี้

1) ขั้นตอนการเตรียมไส้ ปรับปรุงงานย่อย ได้แก่

ขั้นตอนการนำหมูมาฉีกเป็นเส้นเล็ก ๆ และขั้นตอนการนำหมูไปอบจนแห้ง รวมขั้นตอนการทำงานเข้าด้วยกัน (C) และปรับปรุงวิธีการทำงาน (S) โดยการใช้หมูฉีกสำเร็จแล้ว นำมาผสมกับน้ำแกงหมูชะมวง

2) ขั้นตอนการขึ้นรูปและทอดผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ป ปรับปรุง 2 งานย่อย ได้แก่

ขั้นตอนการนำกะหรี่ปั๊บลงไปทอด จัดลำดับงานใหม่ให้เหมาะสม (R) โดยเปลี่ยนจากทอดครั้งเดียวเป็นการทอดหนึ่งครั้งและแช่แข็ง และนำมาทอดอีกครั้งเมื่อต้องการจัดจำหน่าย

ขั้นตอนการวางชิ้นที่ทำเสร็จก่อนพักไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ปิดด้วยผ้าขาวบาง จนกว่าจะทำครบทุกชิ้น จัดลำดับงานใหม่ให้เหมาะสม (R) โดยนำแบ่งที่ปั้นเสร็จแล้ว มาอบและแช่แข็ง เมื่อต้องการจัดจำหน่ายนำออกมาทอด

จากแผนภูมิกระบวนการไหลในขั้นตอนการเตรียมไส้มีทั้งหมด 11 ขั้นตอนย่อย ลดขั้นตอนย่อยไป 2 ขั้นตอน เหลือ 9 ขั้นตอนย่อย และเวลาลดลงจากเดิม 34,359 วินาที เหลือ 9,518 วินาที คิดเป็นร้อยละ 72.30 ของเวลาทั้งหมดในขั้นตอนการเตรียมไส้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงขั้นตอนการเตรียมไส้หลังการปรับปรุง

แผนภูมิกระบวนการไหล	กิจกรรม	ปัจจุบัน
กิจกรรม : ขั้นตอนการเตรียมไส้	การดำเนินงาน ○	4
	การขนส่ง ⇒	-
	การรอคอย D	1
	การตรวจสอบ □	-
วิธีทำงาน : หลังปรับปรุง	การเก็บรักษา ▽	-
	เวลา (วินาที)	9,518

คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์				
		○	⇒	▽	□	D
1. ทำแกงหมูชะมวง	7,278	●	⇒	▽	□	D
2. พักไว้จนเย็น	1,800	○	⇒	▽	□	●
3. นำน้ำแกงหมูชะมวงใส่ภาชนะที่เตรียมไว้	45	●	⇒	▽	□	D
4. เทหมูฝอยลงในน้ำแกงหมูชะมวง	23	●	⇒	▽	□	D
5. คลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน	372	●	⇒	▽	□	D

5.4 ผลหลังจากปรับปรุงกระบวนการผลิต

การปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการจัดลำดับงานใหม่ แบ่งการทอดออกเป็น 2 ครั้ง ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสภาพของผลิตภัณฑ์ จึงนำไปทดสอบด้วยวิธีการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส [8] โดยใช้อาสาสมัครจำนวน 20 คน ผู้ทดสอบชิมตัวอย่างที่ใส่รหัสจากการสุ่มด้วยตัวเลขสามตัว จากซ้ายไปขวา เพื่อทำการประเมินลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ แล้วให้คะแนนความชอบตามลำดับคะแนนที่กำหนดไว้โดยใช้แบบทดสอบ 9-point hedonic scale มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 9 โดยคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด นำผลที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาความแตกต่างของคะแนนความชอบของตัวอย่างที่ทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ตัวอย่างกะหรี่ปั๊ปลิ้นหมูชะมวง จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ 01 กะหรี่ปั๊บบแบบดั้งเดิม, 02 กะหรี่ปั๊ปปริมาณการปรุงรสแบบทอด 2 ครั้ง, 03 กะหรี่ปั๊ปปริมาณการปรุงรสแบบอบ มีผู้เข้าร่วมทดสอบจำนวน 20 คน มีอายุระหว่าง 15-30 ปี เป็นเพศชาย จำนวน 4 คน เพศหญิง จำนวน 16 คน

ด้านความชอบโดยรวม พบว่า ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปลิ้นหมูชะมวงที่สูตรที่ 02 ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด โดยมีคะแนนเฉลี่ย 7.15 ± 1.09 รองลงมาคือสูตรที่ 03 และ สูตรที่ 01 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

นอกจากนี้ได้ทำการประเมินหาค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water Activity, a_w) และการประเมินค่าความชื้น ผลการทดสอบดังตารางที่ 6

จากตาราง พบว่า ค่าการประเมินหาค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊ปลิ้นหมูชะมวงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับกรทอดแบบเดิม และการปรับปรุงการทอดทั้งในรูปแบบการทอดทั้งสองครั้ง และการอบ ซึ่งแสดงได้ว่าการเปลี่ยนวิธีการกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊พบจะ

ไม่มีผลต่อความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี นอกจากนี้อาหารลักษณะกึ่งแห้ง (Intermediate Moisture Food) มีค่าวอเตอร์แอกทีวิตีระหว่าง 0.6-0.85 จากการทดสอบถือได้ว่ามีค่าเป็นไปตามลักษณะอาหาร [9]

ตารางที่ 6 ผลการตรวจวิเคราะห์การประเมินค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี

กะหรีบับไส้หมูชะมวง สูตรที่	รายการทดสอบ	
	ค่าความชื้น (g/100g)	ค่าวอเตอร์ แอกทีวิตี (a_w)
01	13.97	0.787
02	13.10	0.811
03	12.70	0.775

6. สรุป

จากการปรับปรุงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์กะหรี บับไส้หมูชะมวงด้วยหลักการ ECRS โดยที่การปรับกระบวนการผลิตใหม่ พบว่าในกระบวนการผลิต ขั้นตอนการเตรียมไส้สามารถลดเวลาและขั้นตอนการทำงานในกระบวนการจากเดิม 34,359 วินาที ลดลงเหลือ 9,518 วินาที คิดเป็นร้อยละ 72.30 ของเวลาทั้งหมดในขั้นตอนการเตรียมไส้ สำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปและทอดผลิตภัณฑ์กะหรีบับ มีการจัดลำดับขั้นตอนในกระบวนการผลิตใหม่ได้แก่ การปรับปรุงโดยการทอด 2 ครั้ง และการปรับปรุงโดยการทอดครั้งที่ 1 จากนั้นนำมาอบไล่ไขมัน และทอดซ้ำอีกครั้ง ทั้ง 2 รูปแบบจะทำการทอดครั้งที่ 2 ก็ต่อเมื่อมีการจัดจำหน่าย เมื่อต้องการนำไปขายงานแสดงสินค้า ทำให้ลดเวลาในการรอคอยในการเตรียมวัตถุดิบ สามารถนำผลิตภัณฑ์กะหรีบับมาทอดและจัดจำหน่ายต่อไปเมื่อพบว่าค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทีวิตี ทั้งในรูปแบบกระบวนการผลิตดั้งเดิม รูปแบบกระบวนการผลิตแบบทอด 2 ครั้ง และกระบวนการผลิตแบบอบไม่มีผลกระทบต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์กะหรีบับ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของอาหารทอด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในอาหารทอดควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 หากอาหารทอดมีความชื้นสูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการอมน้ำมันและเหม็นหืนได้ง่าย แต่ถ้ามีความชื้นต่ำเกินไปส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งกระด้างและไม่รับประทาน ค่าวอเตอร์แอกทีวิตีที่เหมาะสมในอาหารทอดควรต่ำกว่า 0.85 เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร [10, 11] ในการวิเคราะห์การทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า รูปแบบกระบวนการผลิตแบบทอด 2 ครั้ง มีความชอบโดยรวมมากที่สุด แสดงได้ว่า รูปแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการวิจัยนี้คือ รูปแบบกระบวนการผลิตแบบทอด 2 ครั้ง โดยไม่ต้องใช้กระบวนการผลิตแบบอบ ซึ่งทำให้ช่วยประหยัดด้านต้นทุนในเรื่องของไฟฟ้าที่ต้องนำไปเข้าเครื่องอบ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 อาหารประเภททอดจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนง่าย ควรทดลองหาบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม เพื่อช่วยในการยืดอายุผลิตภัณฑ์ต่อไป

7.2 รูปแบบที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับสนับสนุนจากเงินงบประมาณกองทุนวิจัย และด้วยความร่วมมือของ คณะผู้วิจัยทุกท่าน รวมถึงได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพัตรา เลิศวนิชย์วัฒนา, เพ็ญขวัญ ชมปรีดา, วิชัย หฤทัยธนาสันต์ และกล้าณรงค์ ศรีรอด, การพัฒนา ผลิตภัณฑ์กะหรี่ปั๊บบ้างจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ. ใน *การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41*, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพมหานคร, 3-7 กุมภาพันธ์, 2546, น. 323-330.
- [2] วิจิตรา เหลียวตระกูล และวชิรญา เหลียวตระกูล, “การพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกแตกเดียวทอดกรอบโดย ใช้ตู้อบลมร้อน,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*. ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, หน้า 35-47, 2564.
- [3] มินดา สุวรรณ, ทิพวรรณ วรรณะ, วันชัย สมบัติทอง, สุวิจักขณ์ เส่งสุข และฐิติมาพร ศรีรักษ์, “ผลของชนิด น้ำตาลและการควบคุมคุณภาพการผลิตต่อการยอมรับขนมเจาะหู,” *วารสารเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 47-58, มกราคม-มิถุนายน, 2566.
- [4] วิชญา จันทนา และวัชรพจน์ ทรัพย์สงวนบุญ, “การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเซรามิก: กรณีศึกษา โรงงานในจังหวัดสมุทรปราการ,” *วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้า 58-83, กรกฎาคม-ธันวาคม, 2563.
- [5] วันรัตน์ จันทกิจ, *17 เครื่องมือนักคิด*. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, 2553.
- [6] ปรียามาศ มณีวรรณ, “การประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษาโรงงานผลิต แผงวงจรไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น,” *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, กรุงเทพมหานคร, 2560.
- [7] มินดา สุวรรณ, ทิพวรรณ วรรณะ, วันชัย สมบัติทอง, สุวิจักขณ์ เส่งสุข และฐิติมาพร ศรีรักษ์, “ผลของชนิด น้ำตาลและสภาวะการทอดต่อการยอมรับขนมเจาะหู,” *วารสารเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 47-58, มกราคม-มิถุนายน, 2566.
- [8] ศูนย์วิจัยและพัฒนานวัตกรรมสินค้าเกษตรและอาหารภาคตะวันออก, “การทดสอบทางประสาทสัมผัส ค่า ความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้,” [ออนไลน์]. Available: <http://www.classforecast.rbru.ac.th>. (เข้าถึง เมื่อ: 19 กันยายน 2567).
- [9] P. P. Lewicki, “Water as the determinant of food engineering properties” *A review Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 4, pp. 483-495, March 2004.
- [10] J. M. Kim, J. H. Choi, Y. S. Choi and D. J. Han, “Effects of frying time and temperature on formation of acrylamide and sensory evaluation in french fries” *Korean Journal of Food Science and Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 471-475. January 2009.
- [11] S. Sahin and S. G. Sumnu, *Advances in deep-fat frying of foods*, 1st ed, Ireland: CRC press, 2009, 10-16.

Assessing Vegetation Change from 2005 to 2024 Using Remote Sensing and Geographic Information Systems: A Case Study of the Phung River Basin, Sakon Nakhon Province

Narathip Ruksajai¹, Phayom Saraphirom^{2*} and Worapong Lohpaisankrit³

^{1,2}Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

payosa@kku.ac.th

Received 20 January 2025

Revised 21 April 2025

Accepted 28 April 2025

Abstract

This study enhances the detection of vegetation changes in Thailand's Phung River Basin, Sakon Nakhon province, by applying the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) within a GIS and remote sensing framework from 2005 to 2024. NDVI, a globally recognized indicator of vegetation health and ecological conditions, was calculated using multi-temporal Landsat imagery. The analysis classified vegetation into five density categories across five time points—2005, 2010, 2015, 2020, and 2024—revealing significant ecological shifts. Dense vegetation increased notably from 11.39% to 20.58%, while areas with moderate and sparse vegetation declined. These changes aligned with demographic trends, including population growth from 2005 to 2020 and a sharp 24% decrease from 2020 to 2024, as well as the implementation of stricter land-use policies. By integrating NDVI-derived analysis, GIS-based spatial modeling, and Δ NDVI change detection, the study substantially improved the monitoring of vegetation dynamics. This approach enabled precise identification of degradation and regeneration zones, offering a practical model for sustainable land management. The methodology presents a scalable tool for other tropical watersheds, supporting regional sustainability strategies across Southeast Asia. The results indicate that vegetation dynamics within the Phung River Basin are closely associated with human-driven activities, notably agricultural expansion and the implementation of land-use regulations. These findings provide essential baseline information to support the development of effective and sustainable forest management policies moving forward.

Keywords: NDVI, Remote Sensing, Landsat Imagery, GIS, Vegetation Change Detection

1. Introduction

Global forest cover is a critical indicator of our planet's environmental health. Natural, non-degradable forests provide numerous functions, such as nutrient recycling, climate regulation, soil stabilization, and waste decomposition, while supporting various recreational opportunities and natural ecosystems [1]. Although forests worldwide still encompass almost 40 million km² [2], they have been gradually declining each year. Similarly, Thailand's natural forests, covering 162,909.04 square kilometers [3], have experienced significant degradation in recent years [4], with biodiversity declining due to excessive resource use [3]. In the context of Thailand, understanding forest change at the watershed level—such as the Phung River Basin—is essential for formulating localized environmental policies.

Due to agricultural and urban growth, particularly in the northeastern region, forest regions in Thailand have seen significant decline in the last few decades. Challenges remain in managing forest encroachment and accurately monitoring changes at the micro-watershed level, despite reforestation efforts and government preservation policies. One such vulnerable area requiring ecological evaluation at the local level is the Phung River Basin. This study focuses on the Phung River Basin to illustrate how rapidly forest cover can deteriorate under the combined pressures of climate change and human activity. The basin, recognized for its rich forest heritage and hydrographic network, currently faces challenges such as illegal logging, overgrazing, land clearing, agricultural expansion, and destructive fires—indicating the urgent need for sustainable forest management strategies [36].

Understanding the evolution of forest cover is paramount for regions experiencing severe degradation, as even minimal changes can directly impact natural resource availability [5]. High spatial resolution satellite data provides a critical advantage in remotely assessing forest cover. As shown in [6], C. Suwanprasit and N. Shahnawaz conducted a comparative analysis of fire-affected forest regions in Thailand's Mae Hong Son and Chiang Mai provinces, with a particular focus on Mae Chaem, Chom Thong, Hod, Mae La Noi, and Mae Sariang districts. Their investigation employed vegetation indicators to evaluate the extent and impact of fire damage across diverse ecological zones. Building on these findings, the present study leverages NDVI, derived from Landsat satellite imagery, as a principal metric for forest cover assessment [7, 8]. Numerous peer-reviewed studies have demonstrated the reliability of NDVI in capturing forest dynamics and ecological viability, particularly in detecting long-term habitat degradation through Landsat-based time-series analysis [7], [8], [29]. It has also been effectively applied to monitor vegetation dynamics in Mediterranean environments using multi-resolution satellite data [16]. Moreover, its utility in detecting forest cover change driven by anthropogenic and environmental factors has been confirmed in localized studies, such as those conducted in the Metekel Zone of Northwest Ethiopia [17]. For example, post-fire forest recovery in Mediterranean regions was examined by Lopes et al. (2024) using NDVI, and the impacts of land use and climate change on the dynamics of forest NDVI in Romania were stressed by Prăvălie et al. (2022). The dependability of NDVI as a remote sensing instrument for assessing environmental changes across diverse settings is emphasized in these studies. NDVI is calculated by examining the red (R) and near-

infrared (NIR) bands' reflectance differences, which drone- or satellite-based sensors can detect [9], [29]. In principle, positive NDVI values indicate vegetation and negative values imply non-vegetated areas, indicating the proportion of plant cover [10].

Utilizing NDVI-derived Landsat data and Geographic Information Systems (GIS), the research intends to examine vegetation changes in the Phung River Basin between 2005 and 2024 and evaluate the effects of human development on forest regions. The quantification of forest degradation is possible using this method and underpins the expansion of approaches to alleviate soil erosion as well as stimulate sustainable administration of the watershed.

1.1 Long-Term Vegetation Analysis: The study utilizes remote sensing and GIS techniques to evaluate changes in vegetation from 2005 to 2024, offering a robust temporal perspective.

1.2 Integration of Diverse Data Sources: The research combined Landsat satellite imagery with field surveys and GIS-based spatial analysis, providing a detailed understanding of vegetation dynamics in the Phung River Basin.

1.3 Practical Environmental Implications: The findings inform resource management strategies aimed at mitigating soil erosion, conserving biodiversity, and guiding sustainable land use planning.

1.4 Extended Temporal Range: Unlike previous work that often focuses on short timeframes, this research covers nearly two decades of vegetative change (2005–2024), enabling a more nuanced understanding of long-term environmental trends.

1.5 Localized Focus with Broader Implications: While it provides a case study of the Phung River Basin, the methodology and outcomes can be adapted and applied to similar watershed regions elsewhere.

1.6 Comprehensive Methodological Approach: The amalgamation of remote sensing, GIS, and field-validation data permits a higher level of accuracy and specificity in monitoring vegetation changes, surpassing standard desktop analyses.

Unlike previous studies that examined short-term NDVI fluctuations, this research offers a 19-year perspective with high classification accuracy, enabling the detection of nuanced ecological transitions in a tropical watershed.

2. Materials and methods

2.1 Area of Study

The Phung River basin, situated in northeastern Sakon Nakhon province, Thailand, is a branch of the Mekong River Basin situated between 16° 20' 0"–17° 18' 0" north latitude and 103° 80' 0"–104° 16' 0" east longitude (Fig. 1). The Nam Un River tributary basin is north, and the Kam River basin is east. The Phung River, from the western mountain range at Phu Sila and Phu Nong Ma, is the basin's main river. The river travels through Phu Phan, Tao Ngoi, and Khok Si Suphan districts before emptying into Nong Han at Ban Don Yang, Lao Po Daeng Sub-district, Sakon Nakhon province. The Phung River, supplies the province with freshwater, runs 76.44 kilometers from Nam Phung Dam to Nong Han. Basin waterways intersect on both sides. In Sakon Nakhon province, the Phung River basin

covers 1,639.60 square kilometers in the Phu Phan District, Tao Ngoi District, Mueang Sakon Nakhon District, and Khok Si Suphan Districts. In the central section, plains with hills transition from high mountains and steep slopes in the upper basin. The basin's lowest part is flat and gradually undulating. The basin's altitude is 300–500 meters above sea level. Typical wind speeds are 2.1 to 3.9 knots or Light Air to Light Breeze. The primary seasonal winds are the northeast and southwest monsoons, from November to February and April to May. Pacific Ocean and South China Sea cyclones and depression storms barely affect Sakon Nakhon. The mountain ranges in Vietnam and Laos slow these gales, weakening them before reaching Thailand. Storms usually bring heavy rain and moderate winds. About two depression storms occur annually [11]. Annual lows and highs are 22.3°C to 31.9°C. The average yearly rainfall in Sakon Nakhon is 1,661.7 mm [11]. Sakon Nakhon province, specifically the Phung River Basin, was selected as the study area due to its ecological sensitivity and diverse topographic characteristics, including mountainous terrains, forested uplands, and fertile lowlands. This area is critical as a headwater basin supplying freshwater for agriculture and local communities. Over recent decades, it has become increasingly susceptible to anthropogenic pressures such as deforestation, agricultural expansion, and land degradation, collectively contributing to significant changes in vegetation cover and ecosystem health.

Moreover, the Phung Basin offers a high temporal continuity of satellite imagery data, particularly from the Landsat program, from 2005 to 2024. This makes it highly suitable for long-term spatiotemporal vegetation analysis using NDVI. The period aligns with notable socio-environmental transitions in the region, including population growth and changing land-use patterns under rural development policies [19].

In terms of tracking forest changes in transitory environments, the Phung River Basin is a beneficial case study from an academic standpoint. Adding to the design of evidence-based reforestation approaches and sustainable environmental planning, the outcomes from this region are generally appropriate to comparable agroecological zones throughout Southeast Asia.

The basin's topography is varied, with flat floodplains downstream, undulating lowlands in the middle, and high mountainous regions in the upper reaches. With a heterogeneous landscape at an altitude ranging between 300 and 500 meters above sea level, vegetation dispersal and the sensitivity of the basin to anthropogenic and climatic pressures are boosted.

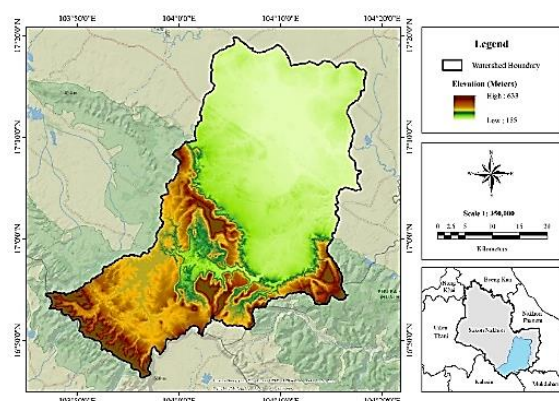


Fig. 1 Phung River Basin study area

2.2 The methodology

The methodology in this study adopts a systematic approach to detect long-term vegetation changes using NDVI over the Phung River Basin from 2005 to 2024. As depicted in Fig. 2, satellite imagery was initially acquired, utilizing Landsat 5 TM for 2005 and 2010 and Landsat 8 OLI-TIRS for 2015, 2020, and 2024, from the USGS Earth Explorer platform. Because of their 30-meter spatial resolution and 16-day revisit cycle, ideal for long-term observation of vegetation in tropical settings distinguished by frequent cloud cover, Landsat 5 and Landsat 8 were chosen, which include sensors offering reliable temporal data over two decades, allowing for the dynamic evaluation of NDVI trends [37]. All imagery underwent preprocessing and processing, including geometric and radiometric corrections, to ensure cross-year comparability and spectral integrity [20], [24]. NDVI was then calculated using the standard formula, as illustrated in Equation 1. The NIR bands, (Band 4 for Landsat 5 and Band 5 for Landsat 8) and the Red band (Band 3 for Landsat 5 and Band 4 for Landsat 8), were extracted from each image to compute NDVI values, which were used to generate NDVI maps for each year (2005, 2010, 2015, 2020, and 2024). Vegetation classification was conducted using the Maximum Likelihood Supervised Classification method, which involved selecting training and validation data from field surveys, thematic maps, and high-resolution imagery from Google Earth [21].

Following classification, an accuracy assessment was conducted through confusion matrices, yielding metrics such as Overall Accuracy and Kappa coefficient to quantify model performance. Using annual NDVI maps, statistical analysis produced maps showing areas of increase or decrease in vegetation cover. Finally, NDVI trend detection across the 19 years provided a temporal perspective on forest change dynamics under anthropogenic and environmental influences [22].

2.2.1 Cloud Masking and Atmospheric Filtering

All satellite images were exposed to a thorough process of cloud masking before NDVI computation in order to confirm the consistency of spectral analysis and reduce interference from the atmosphere, especially in areas with continuous cloud cover. The Function of Mask (Fmask) algorithm [33] was used in this study, which utilizes a programmed, object-based approach purposely constructed to detect and remove atmospheric inconsistencies from Landsat imagery, such as clouds,

cloud shadows, and snow.

To discriminate valid surface reflectance from corrupted pixels, Fmask incorporates spectral thresholding, thermal band assessment, and contextual evaluation, involving spatial adjacency and object morphology. This procedure was created to compensate for the limits of conventional threshold-based cloud detection methods threshold-based cloud detection methods [32], considerably boosting detection accuracy while reducing errors due to omission and commission [31].

This approach has been combined with the United States Geological Survey's (USGS) [34] Landsat Surface Reflectance packages and has been implemented extensively on global remote sensing platforms, such as Google Earth Engine (GEE) [35] and the Earth Resources Observation and Science Processing Archive (ESPA). To manage five Landsat scenes traversing from the years 2005 to 2024, with only clear-sky pixels preserved for NDVI generation, this study applied Fmask version 4.0 using the ERDAS Imagine preprocessing module.

Because cloud-corrupted pixels can misrepresent values for red and near-infrared reflectance, causing inaccurate vegetation signals or understatement of vegetation density, NDVI-based vegetation analysis requires precise cloud masking. Spectral integrity and temporal stability can be ensured by the use of Fmask before NDVI classification, thus allowing for the active assessment of vegetation dynamics across the 19-year period. For long-term ecological evaluations, particularly within multifaceted tropical environments, such preprocessing is essential to preserving the quality of data. To obtain and evaluate NDVI values over time, combined satellite-based remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) were used in this study. To obtain NDVI maps, allowing for spatial and temporal appraisal of changes in vegetation across the Phung River Basin, Landsat imagery was managed employing ERDAS Imagine and ArcGIS software. A high level of spatial precision and analytical reliability was confirmed across all observation years using this integrative method, underpinning the consistency of NDVI-based vegetation evaluations in dynamic tropical landscapes.

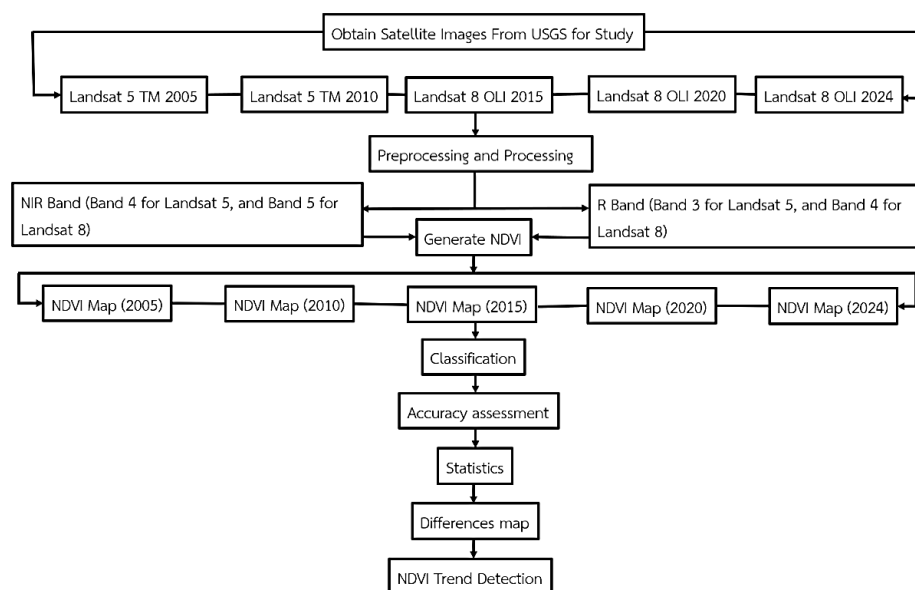


Fig. 2 Flowchart showing the integrated NDVI processing workflow, including satellite image acquisition, preprocessing (e.g., geometric and radiometric corrections), cloud masking via Fmask, NDVI computation, vegetation classification, trend analysis, and validation.

2.3 The collection of data

This research utilized five 30-meter resolution images from the Landsat program from 2005 to 2024, obtained from the US Geological Survey National Center (USGC). The procurement of Landsat 8 OLI coincided with the data collection from Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI (Table 1). This study's main satellite images were taken during the dry season, as this season provides the most significant forest cover disparity compared to other kinds of land development. ERDAS Imagine 2020 and ArcGIS Desktop Version 10.7 software were used for image processing. A 30-meter spatial resolution was used, and for all projection system data, UTM Zone 48 North was used.

Table. 1 Satellite Data of Landsat Images Utilized

Satellite	Sensor	Path/Row	Resolution	Date of Acquisition
LANDSAT-5	TM	127/48	30 Meter	2005
LANDSAT-5	TM	127/48	30 Meter	2010
LANDSAT-8	OLI-TIRS	127/48	30 Meter	2015
LANDSAT-8	OLI-TIRS	127/48	30 Meter	2020
LANDSAT-8	OLI-TIRS	127/48	30 Meter	2024

2.4 NDVI Preprocessing and Spectral Analysis

The NDVI ranges were from -1 to 1. The low values suggested unproductive rock, sand, snow areas, and clouds. Moderate values point to shrubs and meadows, while high values indicate extensive vegetation. As stated by [12], the NDVI value for exposed soil is around zero, and negative values relate to wetland areas. NDVI is a vegetation index that evaluates vegetation quantity, quality, and evolution by determining specific bands of the electromagnetic spectrum [13] via the strength of the radiation. The formula used for calculating NDVI was [14]:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

Where:

NIR - Near infrared (Band 4 for Landsat 5, and Band 5 for Landsat 8);

R - Red (Band 3 for Landsat 5, and Band 4 for Landsat 8)

The Vegetation Index was grouped into ranges using the determined Normalized Difference. NDVI values for bare rock, sand, or snow are often relatively low and correlate to classes (no vegetation).

Low levels depict shrubs and grasslands, while intermediate values represent senescent crops, which are moderately vegetated. High to very high NDVI values indicate profuse vegetation [15].

Classifying NDVI values into discrete vegetation density classes allows researchers to detect and monitor landscape-scale vegetation changes with high accuracy and consistency. This method has been widely validated through field calibration, high-resolution remote sensing, and ecological indicators [22].

The five vegetation density classes used in this study were informed by NDVI thresholding approaches described in earlier remote sensing research, which demonstrated their applicability in assessing vegetation structure across diverse ecological settings [23], [28]. These thresholds are typically linked to land cover types and demonstrate efficacy across tropical, temperate, and semi-arid environments, as indicated in Table 2.

Landsat imagery was sourced from the USGS Earth Explorer platform, covering 2005 to 2024. All preprocessing and analysis were conducted using ERDAS Imagine 2020 and ArcGIS Desktop 10.7. This workflow ensures consistent data quality across years and supports robust spatiotemporal vegetation analysis [20].

Table. 2 NDVI Classification and Vegetation Density Interpretation

NDVI Range	Vegetation Density Class	Ecological Description
-0.19 to 0.08	Very Low Density	Water bodies, bare soil, urban surfaces, clouds, or snow
0.08 to 0.18	Low Density	Sparse vegetation, degraded land, grasslands, or fallow areas
0.18 to 0.24	Medium Density	Croplands, dry forests, or regenerating vegetation
0.24 to 0.31	High Density	Mixed deciduous forests or healthy agroforestry systems
0.31 to 0.51	Very High Density	Dense evergreen forest, mature forest canopy, high-biomass zones

Note: The NDVI classification thresholds presented in this table are informed by foundational principles in remote sensing science and have been further refined through empirical assessment of vegetation reflectance dynamics, calibrated against localized observations within the Phung River Basin. This approach ensures both alignment with globally recognized NDVI standards and sensitivity to the ecological heterogeneity inherent to the study area.

2.5 Ecological Classification of Vegetation Based on NDVI and Field Data

This study used an integrated method for vegetation classification that combined thematic vegetation maps from Thailand's Royal Forest Department and field survey data from the Phung River Basin vegetation was categorized into five ecologically distinct classes based on NDVI thresholds and field-verified land cover types:

1. **No Vegetation:** Barren land, urban surfaces, rocky zones, and water bodies (NDVI < 0.08).
2. **Sparse Vegetation:** Grasslands, shrublands, and degraded landscapes (NDVI 0.08 – 0.18).
3. **Moderate Vegetation:** Semi-natural rangelands and drought-tolerant croplands (NDVI 0.18 – 0.24).
4. **High Forest:** Mixed deciduous forests with partial canopy closure (NDVI 0.24 – 0.31).
5. **Dense Forest:** Evergreen forests with dense canopy cover (NDVI > 0.31).

This classification scheme was validated through high-resolution satellite imagery and spectral analysis, further supported by geospatial references from Google Earth. The methodological framework is conceptually aligned with advanced spatiotemporal data fusion approaches that integrate NDVI signals derived from multi-sensor platforms, including Landsat and Sentinel systems [23], [26].

2.6 Temporal NDVI Trend Analysis for Vegetation Dynamics (2005–2024)

This section provides a detailed classification of NDVI values to reveal spatial and temporal vegetation trends in the Phung River Basin from 2005 to 2024. The study utilized multi-temporal satellite imagery from Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI-TIRS, which were geometrically and radiometrically corrected to ensure spectral comparability across years.

The standardized formula $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ was used to work out the NDVI values, where NIR indicates the near-infrared and Red the red spectral bands [23].

Five bands, very low, low, medium, high, and very high, were used to categorize vegetation density based on ecologically validated NDVI thresholds- The classification employed the Maximum Likelihood Supervised Classification technique with a 70:30 training-to-testing ratio using ground-truth data, Google Earth imagery, and thematic land cover maps [23]. Classification accuracy was validated using confusion matrices, Overall Accuracy (OA), and the Kappa Coefficient.

The results highlight an increasing trend in high and very high NDVI classes, indicating ongoing vegetation recovery and successful land use regulation. Between 2005 and 2024, dense forest cover increased from 11.39% to 20.58%, while areas with very low-density vegetation slightly increased, reflecting residual land degradation in urbanized zones [25].

Table 3 and Fig. 3 collectively illustrate the annualized, NDVI-based vegetation data, which were systematically disaggregated to improve the clarity and interpretability of long-term vegetation dynamics. This disaggregation enables a more precise visualization of interannual variability and ecological transitions spanning from 2005 to 2024, thereby supporting a comprehensive temporal analysis. To further emphasize overarching trends in vegetation cover change, a linear trend line was

incorporated into Fig. 3. This improvement in graphics underscores the constant upward trend in dense vegetation classes, especially due to policy interventions after 2020, and improves the temporal readability of the dataset. Disaggregated temporal data and trend line visualization follow remote sensing analysis best practices and help researchers and land-use policymakers comprehend vegetation dynamics more intuitively. This analysis of NDVI trends provides essential insights for environmental monitoring, sustainable forest policy planning, and assessing ecosystem resilience in tropical transitional landscapes [19]. By examining NDVI trends, stakeholders can make informed decisions that foster environmental sustainability and improve the management of natural resources. This information is crucial for adapting strategies to mitigate the effects of climate change on these ecosystems.

Table. 3 NDVI Ranges and Vegetation Cover Percentages in the Phung River Basin (2005–2024)

Year	Very Low Density (-0.19 - 0.08)	Low Density (0.08 – 0.18)	Medium Density (0.18 – 0.24)	High Density (0.24 – 0.31)	Very High Density (0.31 – 0.51)
2005	5.84	28.06	32.86	21.86	11.39
2010	5.48	20.97	29.31	28.40	15.84
2015	5.43	21.46	28.49	22.57	22.04
2020	6.34	22.05	27.70	23.28	20.63
2024	6.20	21.81	28.68	22.72	20.58

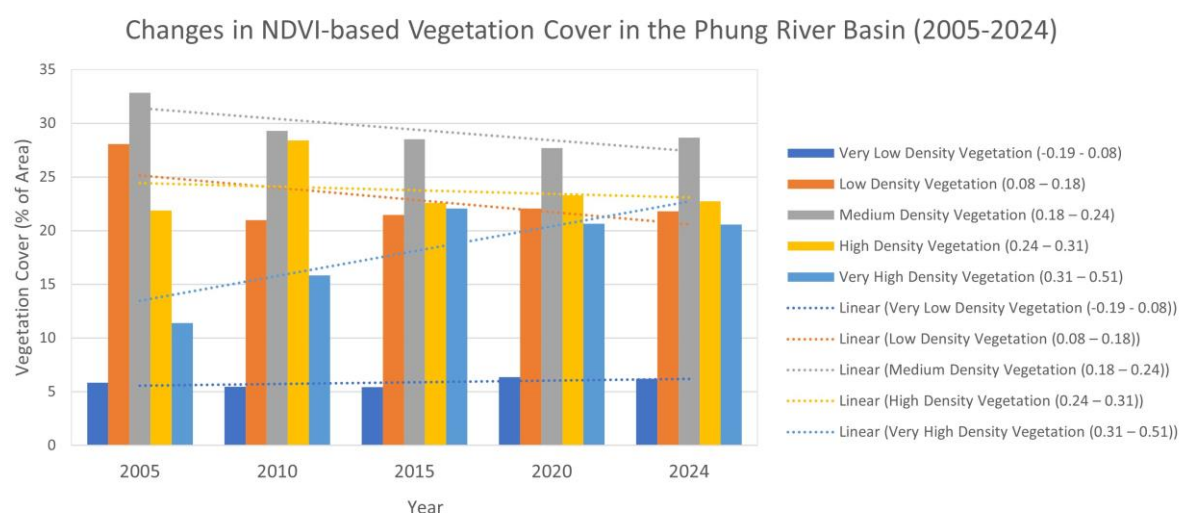


Fig. 3 Enduring trends for NDVI-derivative vegetation density in the Phung River Basin (2005–2024). Bars indicate percentages for annual vegetation class, while dotted lines reveal linear trend patterns, underscoring the dynamic range in high and very high-density flora over time.

2.7 Model Validation and NDVI Classification Thresholds

The Maximum Likelihood Supervised Classification method was used in this study to classify NDVI values across five defined vegetation density classes. To ensure statistical robustness and model generalizability, the dataset was partitioned into 70% training and 30% testing samples. Training data were derived from field survey observations, thematic vegetation maps from Thailand's Royal Forest Department, and high-resolution satellite imagery (e.g., Google Earth) were used to classify vegetation density.

To evaluate classification performance, confusion matrices were employed to compute the overall Accuracy (OA) and Kappa Coefficient (KC), two standard metrics widely accepted in remote sensing studies [30]. In Fig. 4, 130 accuracy assessment points were generated using the ArcGIS Accuracy Assessment Tool, stratified across all five observation years (2005, 2010, 2015, 2020, and 2024).

Beyond partitioning, NDVI classification was guided by ecologically relevant thresholds broadly accepted in remote sensing, reflecting consistent links between vegetation density and spectral response. The criteria for the five NDVI groups are defined as follows:

NDVI -0.19 to 0.08: Very Low Density (Water bodies, bare soil, built-up areas, and snow cover)

NDVI 0.08 to 0.18: Low Density (Sparse vegetation, dry grasslands, and degraded areas)

NDVI 0.18 to 0.24: Medium Density (Seasonal croplands, dry forests, or transitional vegetation)

NDVI 0.24 to 0.31: High Density (Healthy deciduous forests and agroforestry)

NDVI 0.31 to 0.51: Very High Density (Dense evergreen forest, mature canopy with high biomass)

This classification strategy aligns with spectral reflectance behavior and vegetation indices calibrated across tropical and semi-arid ecosystems, ensuring consistency with international remote sensing standards. The categorization also facilitates a longitudinal comparison of vegetation dynamics under anthropogenic and climatic pressures.

Substantial benefits in terms of monitoring vegetation over large spatial and temporal scales, particularly in areas difficult to access consistently, are possible by utilizing satellite-based remote sensing. A reliable, repeatable, and economical approach to evaluating vegetation dynamics is offered by the use of NDVI obtained from multispectral imagery. Satellite imagery enables landscape-scale surveillance at regular times, dissimilar to field-based methods that tend to be physically demanding, time-intensive, and spatially restricted. Although satellite data may be constrained by atmospheric disturbances and geographic resolution, it is easier to access, established, and less expensive than aerial surveys. Nevertheless, limitations exist with satellite-derived NDVI, such as atmospheric intrusion, sensor noise, and cloud defects that can impact precision. In this paper, meticulous preprocessing procedures, comprising Fmask for cloud masking and radiometric correction, were used to counter such limitations. Moreover, overall reliability was enhanced through the integration of field validation data that facilitated the calibration and verification of classification outputs. Remote sensing is an influential tool for long-standing environmental investigation when

combined with Geographic Information Systems (GIS). Even so, classification precision and ecological interpretation can be enhanced, particularly in heterogeneous or transitional environments, by combining satellite imagery with corresponding methods such as ground truthing and high-resolution aerial data.

2.8 Utilizing Δ NDVI for Change Detection

Change detection is critical in monitoring landscape transformation and ecological dynamics across time. This study applied NDVI-based change detection to evaluate temporal vegetation changes between years by calculating the difference in NDVI values (Δ NDVI) derived from multi-temporal satellite imagery. The methodology follows the post-classification comparison or map-to-map detection technique, where classified NDVI maps from different years are overlaid to identify specific change zones [27].

The formula used for detecting vegetation change through NDVI is as follows:

$$\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_{t_2} - \text{NDVI}_{t_1} \quad (2)$$

Where:

NDVI_{t_2} = NDVI value at the more recent time point

NDVI_{t_1} = NDVI value at the earlier time point

An increase in vegetation cover was indicated by positive Δ NDVI values and loss or degradation by negative values [28]. This method ensures a straightforward and quantitative assessment of land cover dynamics using remote sensing data, which is particularly effective when using high temporal resolution sensors such as Landsat [18,25].

The integration of Δ NDVI analysis helps pinpoint areas of active reforestation, degradation, or transition, thus enabling policymakers to implement targeted conservation or restoration efforts. The results are visualized through change maps highlighting spatial transitions in vegetation density.

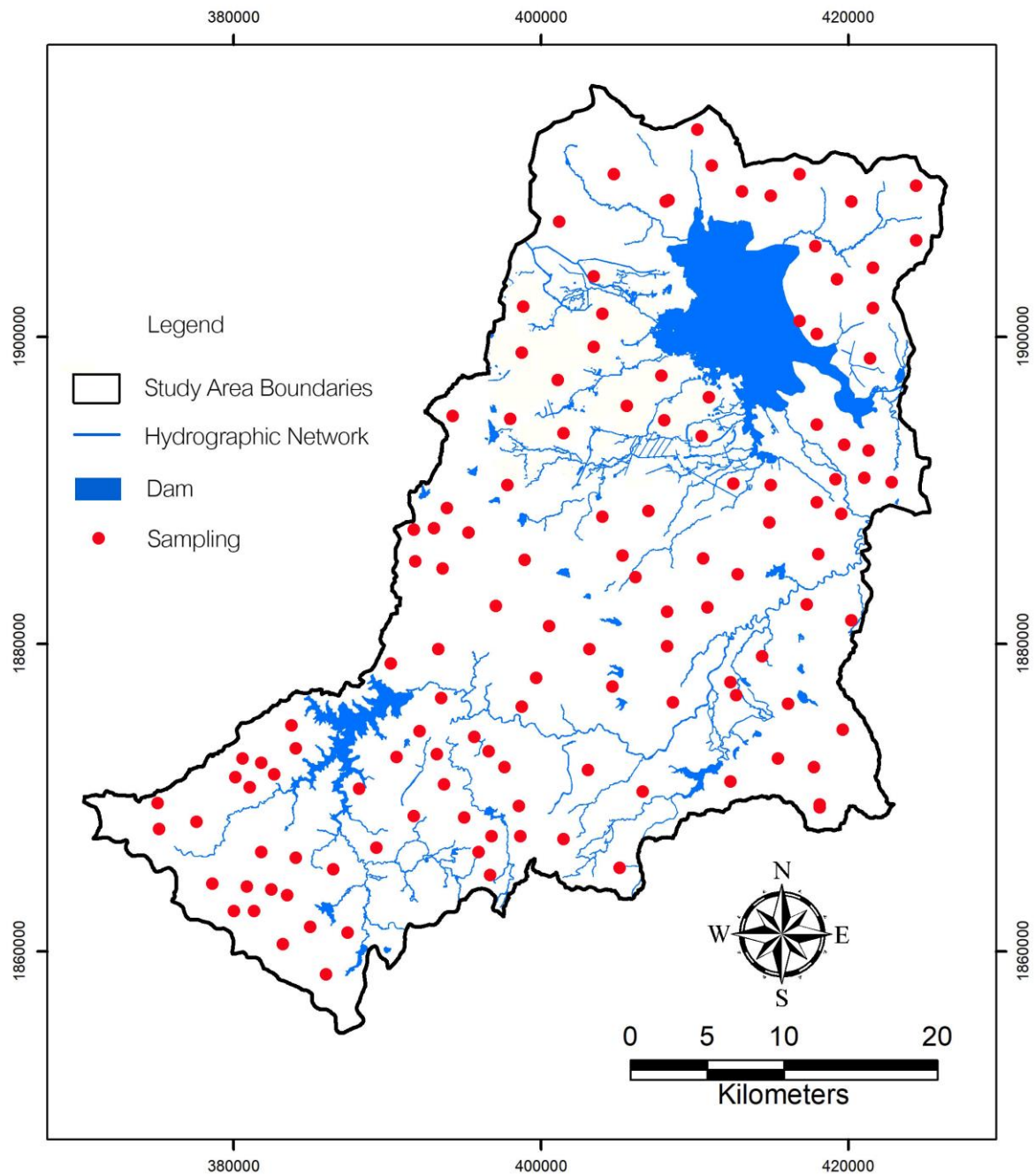


Fig. 4 illustrates the points of reference

3. Results and Discussion

The Phung River Basin, spanning an area of 1,639.60 square kilometers, has experienced significant changes in vegetation cover between 2005 and 2024. Five vegetation density classes, very low, low, medium, high, and very high, were detected based on the NDVI classification. Detailed trends over 19 years (total study period) are shown in Table 3 and Fig. 3.

In 2005, the majority of the basin was characterized by moderate-density vegetation (32.86%), followed by low-density (28.06%), high-density (21.86%), and very high-density (11.39%). By 2024, the proportion of very high-density vegetation increased notably to 20.58%, while moderate-density vegetation declined slightly to 28.68%. The share of low-density vegetation remained relatively stable, whereas very low-density vegetation increased marginally from 5.84% to 6.20%.

Although minor, this increase in very low-density vegetation indicates ongoing land degradation, likely due to urban expansion and persistent anthropogenic pressure in peripheral zones. On the other hand, the expansion of high and very high-density classes suggests partial ecological recovery, potentially driven by reforestation initiatives and stricter land-use regulations implemented post-2020. The relationship between demographic trends and vegetation change is particularly evident. From 2005 to 2020, rapid population growth in Sakon Nakhon Province contributed to deforestation and land conversion, reflected in fluctuating vegetation density. However, between 2020 and 2024, the population declined by 24%, coinciding with a stabilization in land-use practices and increased vegetation density in the upper NDVI classes. This suggests that demographic decline and environmental policies have positively influenced forest regeneration. Change detection through NDVI trends (Fig.4 and Fig.5) underscores the importance of temporal monitoring. The Δ NDVI analysis revealed zones of both degradation and regeneration, with more areas showing positive NDVI changes. Such results demonstrate the utility of NDVI as a tool for environmental management and policy planning, especially in transitional ecosystems.

Field authentication continues to be a vital component for guaranteeing the spatial accuracy of land cover classification, even though satellite remote sensing offers better spatial coverage and temporal resolution when evaluated against ground-based surveys and aerial imagery. Especially in heterogeneous settings where spectral uncertainty can occur frequently, the reliability of vegetation assessments can be enhanced by combining in-situ observations. The interplay between demographic shifts and vegetation dynamics is strikingly apparent. From 2005 to 2020, Sakon Nakhon Province experienced rapid population growth, which fueled deforestation, agricultural land conversion, and urban sprawl, thereby diminishing vegetation density in ecologically fragile zones. Conversely, between 2020 and 2024, the province witnessed a remarkable 24% population decline, coinciding with a shift in land-use practices and a notable increase in vegetation density, particularly in the higher NDVI classes. This finding strongly suggests that the combination of demographic contraction and robust environmental policies has had a positive influence on vegetation regeneration, most notably in the upper reaches of the watershed. Ultimately, this study confirms the critical role of NDVI-based monitoring in guiding sustainable resource management in vulnerable

watersheds like the Phung River Basin. Fig. 6 shows the 2024 NDVI values are appreciably greater than those in 2005, 2010, 2015, and 2020. The projected 2024 mean NDVI was 0.16, whilst the means for 2005, 2010, 2015, and 2020 were 0.14, 0.15, 0.11, and 0.15, respectively. The 2005 to 2024 Landsat image NDVI supervised classification facilitated observing and quantifying Phung River Basin forest cover growth, highlighting various changes over 19 years and producing high-quality maps (Fig. 5). This improvement is attributed to the timing of the satellite imagery captured during the dry period and the ensuing field corroboration. The 2005 classified NDVI accuracy was 93.07%, with a Kappa coefficient of 91.10%. For 2010, the accuracy was 90.77%, and the Kappa coefficient was 88.20%. In 2015, the accuracy reached 95.38%, with a Kappa coefficient of 94%. The 2020 accuracy was 93.08%, and the Kappa coefficient was 91%. The accuracy for the classified NDVI in 2022 is 96.15%, with a Kappa coefficient of 95% (Tables 4 to 8). These statistics indicate a trend of improving accuracy and reliability in the classification of NDVI over the years, with 2022 showing the highest accuracy and Kappa coefficient. This suggests that the methods used for classification have become more effective, leading to more precise assessments of vegetation health and coverage.

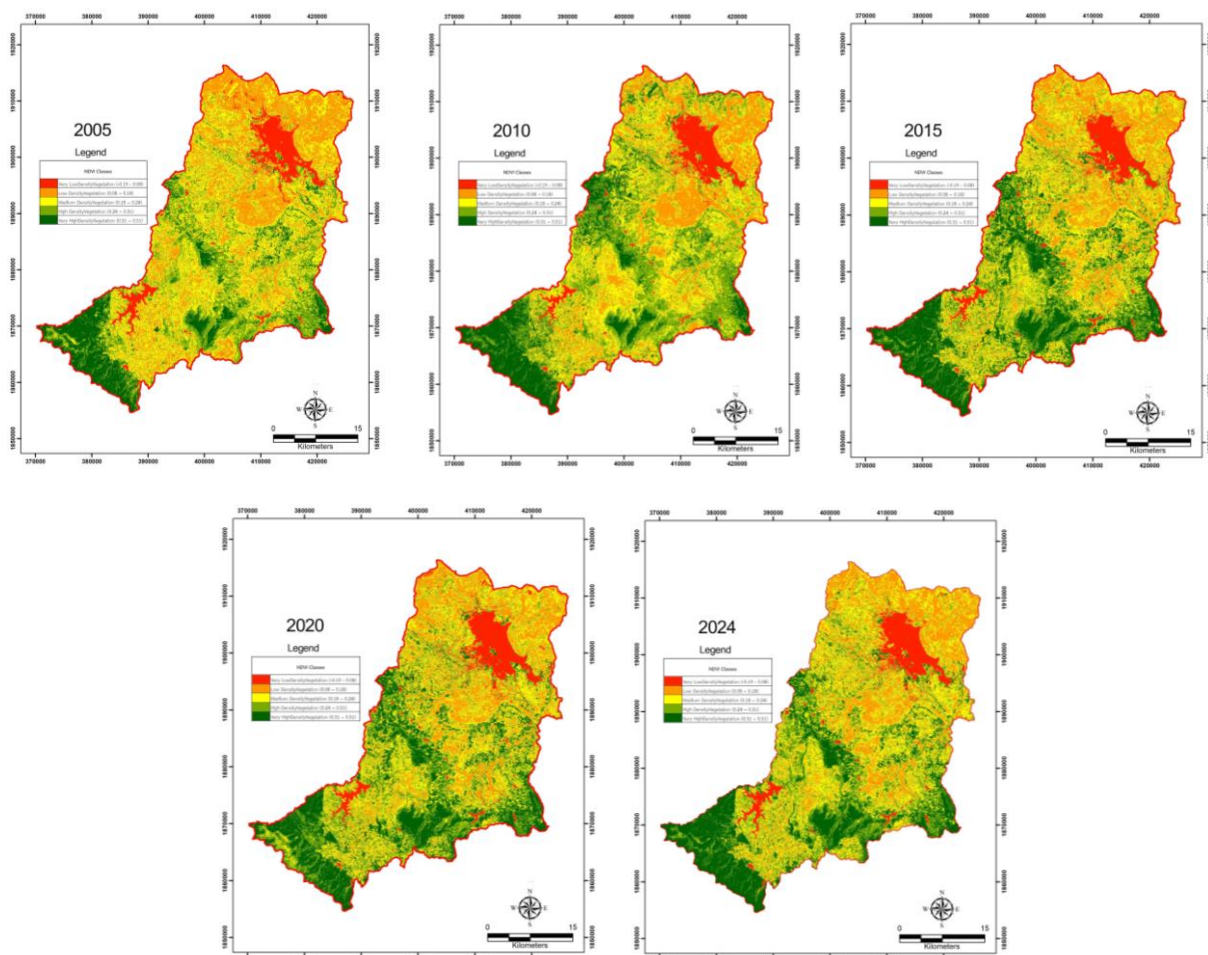


Fig. 5 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps for the Phung River Basin from 2005 to 2024, demonstrating spatial dispersal and the dynamics of vegetation density across five years of examination.

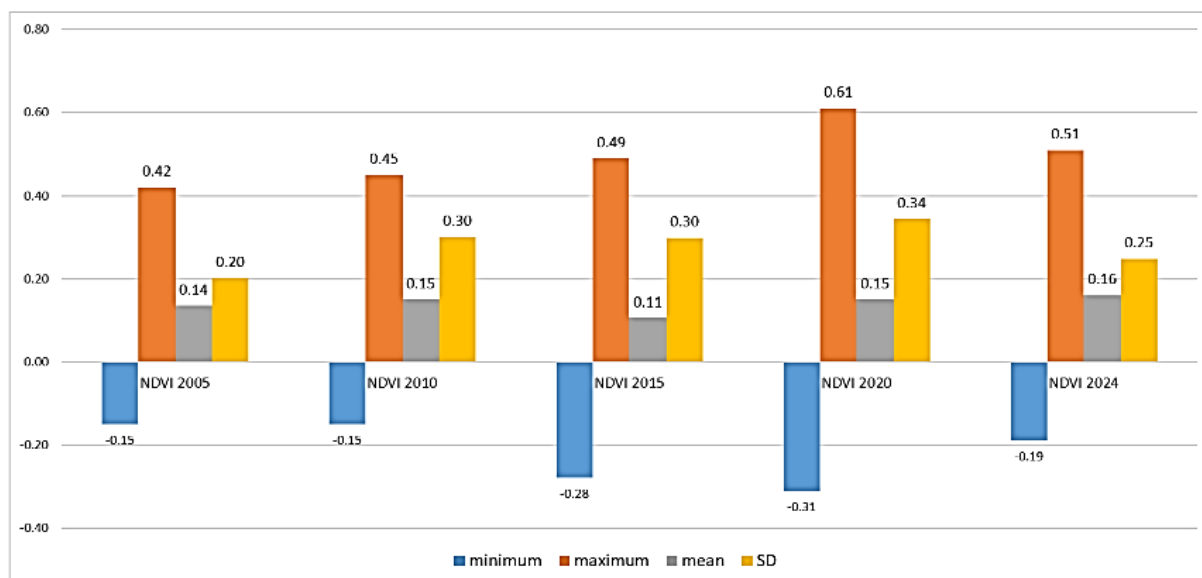


Fig. 6 NDVI values spanning the years 2005 to 2024

Table. 4 Assessment accuracy statistics for the NDVI (2005)

Classification	No vegetation	Sparse vegetation	Moderate vegetation	High vegetation	Dense vegetation	Total user	Use accuracy	Producer accuracy
No vegetation	34	2	0	0	0	36	94.44	97.14
Sparse vegetation	1	12	1	0	0	14	85.71	85.71
Moderate vegetation	0	0	34	2	0	36	94.44	97.14
High vegetation	0	0	0	21	3	24	87.50	91.30
Dense vegetation	0	0	0	0	20	20	100.00	86.95
Total	35	14	35	23	23	130	462.09	458.24
Overall accuracy (%)	93.07							
Kappa coefficient	91.10							

Table. 5 Assessment accuracy statistics for the NDVI (2010)

Classification	No vegetation	Sparse vegetation	Moderate vegetation	High vegetation	Dense vegetation	Total user	Use accuracy	Producer accuracy
No vegetation	34	1	1	0	0	36	94.44	97.14
Sparse vegetation	1	13	0	0	0	14	92.85	76.47
Moderate vegetation	0	3	31	2	0	36	86.11	91.17
High vegetation	0	0	2	21	1	24	87.50	87.50
Dense vegetation	0	0	0	1	19	20	95.00	95.00
Total	35	17	34	24	20	130	455.90	447.28
Overall accuracy (%)	90.77							
Kappa coefficient	88.20							

Table. 6 Assessment accuracy statistics for the NDVI (2015)

Classification	No vegetation	Sparse vegetation	Moderate vegetation	High vegetation	Dense vegetation	Total user	Use accuracy	Producer accuracy
No vegetation	35	0	1	0	0	36	97.22	100.00
Sparse vegetation	0	13	1	0	0	14	92.85	86.66
Moderate vegetation	0	2	34	0	0	36	94.44	91.89
High vegetation	0	0	0	24	0	24	100.00	96.00
Dense vegetation	0	0	1	1	18	20	90.00	100.00
Total	35	15	37	25	18	130	474.51	474.55
Overall accuracy (%)	95.38							
Kappa coefficient	94.00							

Table. 7 Assessment accuracy statistics for the NDVI (2020)

Classification	No vegetation	Sparse vegetation	Moderate vegetation	High vegetation	Dense vegetation	Total user	Use accuracy	Producer accuracy
No vegetation	32	3	1	0	0	36	88.88	96.96
Sparse vegetation	1	11	2	0	0	14	78.50	78.50
Moderate vegetation	0	0	36	0	0	36	100.00	90.00
High vegetation	0	0	0	23	1	24	95.83	100.00
Dense vegetation	0	0	1	0	19	20	95.00	95.00
Total	33	14	40	23	20	130	458.21	460.46
Overall accuracy (%)	93.08							
Kappa coefficient	91.00							

Table. 8 Assessment accuracy statistics for the NDVI (2024)

Classification	No vegetation	Sparse vegetation	Moderate vegetation	High vegetation	Dense vegetation	Total user	Use accuracy	Producer accuracy
No vegetation	36	0	0	0	0	36	100.00	97.29
Sparse vegetation	0	11	3	0	0	14	78.50	100.00
Moderate vegetation	1	0	35	0	0	36	97.22	89.74
High vegetation	0	0	1	23	0	24	95.83	100.00
Dense vegetation	0	0	0	0	20	20	100.00	100.00
Total	37	11	39	23	20	130	471.55	487.03
Overall accuracy (%)	96.15							
Kappa coefficient	95.00							

3.1 Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Cover Based on NDVI Classification from 2005 to 2024

Table. 9 presents the NDVI classification statistics for 2005, 2010, 2015, 2020, and 2024.

Classification	NDVI 2005		NDVI 2010		NDVI 2015		NDVI 2020		NDVI 2024	
	area	area	area	area	area	area	area	area	area	area
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
No vegetation	95.70	5.84	89.81	5.48	89.09	5.43	104.03	6.34	101.63	6.20
Sparse vegetation	460.11	28.06	343.77	20.97	351.89	21.46	361.48	22.05	357.66	21.81
Moderate vegetation	538.73	32.86	480.57	29.31	467.20	28.49	454.21	27.70	470.23	28.68
High vegetation	358.35	21.86	465.72	28.40	369.99	22.57	381.67	23.28	372.60	22.72
Dense vegetation	186.71	11.39	259.74	15.84	361.44	22.04	338.21	20.63	337.48	20.58
Total	1639.60	100.00	1639.60	100.00	1639.60	100.00	1639.60	100.00	1639.60	100.00

Table 9 analyzes NDVI-based vegetation classification from 2005 to 2024, showing significant vegetation density changes in the study area; the “Dense vegetation” and “No vegetation” categories exhibited the most pronounced changes.

The area of dense vegetation increased markedly from 186.71 km² (11.39%) in 2005 to a peak of 361.44 km² (22.04%) in 2015 before showing a slight decline to 337.48 km² (20.58%) in 2024. This trend may reflect afforestation efforts, natural vegetation recovery, or land management policies implemented during the early 2010s. Conversely, the area with no vegetation showed minor fluctuations, peaking at 6.34% in 2020 before slightly decreasing to 6.20% in 2024. These changes might be linked to urban expansion or land degradation due to unsustainable agricultural practices. The “Sparse vegetation” and “Moderate vegetation” classes demonstrated relatively stable patterns, with slight declines in earlier years followed by stabilization. Sparse vegetation decreased from 28.06% in 2005 to around 21.81% in 2024, while moderate vegetation slightly declined but rebounded marginally by 2024.

3.2 Spatiotemporal Analysis of Vegetation Change Based on NDVI-Derived Δ NDVI Metrics (2005–2024)

Table. 10 Alterations in the area of vegetation category between 2005 and 2024

Classification	Change detection between 2005 and 2024	
	area (km ²)	area (%)
No vegetation	5.93	0.36
Sparse vegetation	-102.46	-6.25
Moderate vegetation	-68.50	-4.18
High vegetation	14.25	0.87
Dense vegetation	150.77	9.20
Total	0.00	0.00

The Phung River Basin spatiotemporal analysis of Vegetation dynamics from 2005 to 2024, as assessed via NDVI-based remote sensing, reveals distinct patterns of ecological transformation across the landscape. According to Table 10, the most notable change occurred in the “Dense vegetation” class, which expanded by 150.77 km² or 9.20% of the total basin area. This increase is likely to reflect effective reforestation campaigns, natural vegetative succession, and the implementation of more rigorous land-use policies in the post-2020 period. Conversely, both “Sparse vegetation” and “Moderate vegetation” classes exhibited significant reductions—by 102.46 km² (−6.25%) and 68.50 km² (−4.18%), respectively—suggesting a transition of semi-natural and agricultural lands into degraded or urbanized states.

Interestingly, the “No vegetation” category experienced a modest increase of 5.93 km² (0.36%) despite a 24% population decline between 2020 and 2024. This paradox suggests that land degradation and anthropogenic pressure may persist independently of demographic trends, possibly due to legacy land use, infrastructure expansion, or lack of ecological recovery mechanisms.

The NDVI change detection (Δ NDVI) results, as summarized in Table 11, highlight a nearly symmetrical pattern of ecological shifts: 170.96 km² (10.43%) of the area showed a positive NDVI change—indicating recovery—while 170.95 km² (10.42%) showed a negative change—indicating degradation. The remaining 1,297.69 km² (79.15%) exhibited no significant change. This duality suggests a transitional ecological state with simultaneous processes of forest regeneration and degradation occurring in different zones.

These findings affirm the utility of NDVI-based analysis in identifying subtle but ecologically significant vegetation shifts. They also underscore the value of continuous satellite-based monitoring in guiding sustainable landscape management, particularly in environmentally sensitive and demographically dynamic regions like the Phung River Basin. Taken as a whole, the findings demonstrate how vegetation cover changed dynamically during the course of the study, influenced by changes in land use, variations in the climate, and decisive efforts toward preservation. NDVI data were coordinated into five-year periods for enhanced interpretability (2005, 2010, 2015, 2020, and 2024), supporting the comprehensible conception of trends. To highlight key ecological changes,

especially an abrupt increase in dense vegetation between 2005 and 2015 and the ensuing stabilization seen after 2020, data were also categorized by classes of vegetation density.

The results by Lopes et al. (2024), who described forest recovery determined by policy mediation are in line with the rise in dense vegetation perceived in the Phung River Basin from 2005 to 2024. However, other studies detected decreasing forest NDVI trends in Eastern Europe, mainly because of sustained drought and the expansion of land use, such as the study by Prävălie et al. (2022). The significance of local context in regulating vegetation consequences is highlighted by this distinction and emphasizes the achievement of recent preservation efforts in the Phung River Basin.

Table. 11 NDVI-based vegetation change detection from 2005 to 2024

Type of change	area (km ²)	area (%)
Positive	170.96	10.43
Negative	-170.95	10.42
No change	1297.69	79.15
Total	1639.60	100.00

4. Conclusion

This study provides evidence of significant vegetation changes in the Phung River Basin between 2005 and 2024, based on NDVI-derived satellite analysis. Notably, dense vegetation areas increased from 11.39% to 20.58%, while sparse and moderate vegetation areas declined. These findings align with earlier studies, such as Lopes et al. (2024), which reported that NDVI effectively captures post-disturbance forest recovery, and Prävălie et al. (2022), who demonstrated that land-use and climatic changes were involved in forest NDVI trends.

The relationship between vegetation dynamics and population growth is particularly evident. Between 2005 and 2020, a growing population drove forest encroachment, agricultural expansion, and urbanization, reducing vegetation density in ecologically sensitive areas. In contrast, from 2020 to 2024, the population declined by 24%, coinciding with the implementation of more stringent zoning and environmental regulations. This demographic shift, combined with policy interventions, is likely to have facilitated vegetation regeneration—especially in the upper watershed.

Overall, this study underscores the practical relevance of NDVI-based change detection as a reliable method for long-term ecological monitoring. The findings offer valuable insights for policymakers, particularly in designing sustainable land use strategies and reforestation efforts. Moreover, the methodology employed in this research is transferable to other tropical basins in Southeast Asia, enabling broader application in climate-resilient landscape management and biodiversity conservation planning.

The outcomes of this study provide valuable insights for shaping policy frameworks aimed at forest conservation and ecological restoration on a regional scale, especially within ecologically

vulnerable areas. Incorporating NDVI-derived data into land-use planning processes will significantly strengthen the efficacy of systematic approaches to natural resource management.

5. Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Groundwater Resources Institute, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, for providing essential geospatial data and technical support. Appreciation is also extended to the Royal Irrigation Department for supplying critical datasets and instrumentation that supported the successful completion of this study.

6. References

- [1] K. Mehmood et al., "Analyzing vegetation health dynamics across seasons and regions through NDVI and climatic variables," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 11775, May 2024.
- [2] Visual Capitalist, "Which Countries Have the Largest Forests?" [Online]. Available: <https://www.visualcapitalist.com/which-countries-have-the-largest-forests/>. (Accessed: December 20, 2024).
- [3] Seub Nakhasathien Foundation, "Forest and environmental situation 2023" [Online]. Available: <https://www.seub.or.th/forest-environmental-2023/>. (Accessed: December 20, 2024).
- [4] G. Aziz, N. Minallah, A. Saeed, J. Frnda, and W. Khan, "Remote sensing based forest cover classification using machine learning," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 69, January 2024.
- [5] M. Konatowska, A. Młynarczyk, W. Kowalewski, and P. Rutkowski, "NDVI as a potential tool for forecasting changes in geographical range of sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.)," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 19818, November 2023.
- [6] C. Suwanprasit and N. Shah Nawaz, "Mapping burned areas in Thailand using Sentinel-2 imagery and OBIA techniques," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 9609, April 2024.
- [7] W. Han et al., "Assessment of vegetation drought loss and recovery in Central Asia considering a Comprehensive Vegetation Index," *Remote Sensing of Environment*, vol. 16, no. 22, p. 4189, November 2024.
- [8] K. Kulesza and A. HoŚcico, "Influence of climatic conditions on Normalized Difference Vegetation Index variability in forest in Poland (2002–2021)," *Meteorological Applications*, vol. 30, no. 5, September 2023.
- [9] J. Mašek, J. Tumajer, J. Lange, R. Kaczka, P. Fišer, and V. Tremel, "Variability in tree-ring width and NDVI responses to climate at a landscape level," *Ecosystems*, vol. 26, no. 5, pp. 1144–1157, January 2023.
- [10] P. Hajek et al., "Quantifying the influence of tree species richness on community drought resistance using drone-derived NDVI and ground-based measures of Plant Area Index and leaf chlorophyll in a young tree diversity experiment," *European Journal of Forest Research*, vol. 143, no. 1, pp. 141–155, October 2023.

- [11] Thai Meteorological Department, "*Thai Meteorological Department: Sakon Nakhon Province Weather*" [Online]. Available: <https://www.tmd.go.th/weather/province/sakon-nakhon>. (Accessed: December 20, 2024).
- [12] D. Udoma-Michaels and O. Akinola, "Analysis of Vegetation Index of Protected Forests in Akwa Ibom State, Nigeria between 2000 and 2021," *OALib*, vol. 09, no. 06, pp. 1–17, January 2022.
- [13] E. Rahimi, P. Dong, and C. Jung, "Global NDVI-LST Correlation: Temporal and Spatial Patterns from 2000 to 2024," *Environments*, vol. 12, no. 2, pp. 67, February 2025.
- [14] J. D. Stamford, S. Vialet-Chabrand, I. Cameron, and T. Lawson, "Development of an accurate low cost NDVI imaging system for assessing plant health," *Plant Methods*, vol. 19, no. 9, January 2023.
- [15] S. Erasmi, M. Klinge, C. Dulamsuren, F. Schneider, and M. Hauck, "Modelling the productivity of Siberian larch forests from Landsat NDVI time series in fragmented forest stands of the Mongolian forest-steppe," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 193, no. 4, March 2021.
- [16] F. Maselli, M. A. Gilabert, and C. Conese, "Integration of high and low resolution NDVI data for monitoring vegetation in Mediterranean environments," *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, no. 3, pp. 208–218, March 1998.
- [17] T. T. Wahelo, D. A. Mengistu, and T. M. Merawi, "Spatiotemporal trends and drivers of forest cover change in Metekel Zone forest areas, Northwest Ethiopia," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 196, no. 12, November 2024.
- [18] E. Vera et al., "Change of vegetation cover and land use of the Pómac forest historical sanctuary in northern Peru," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 14, pp. 8919–8930, April 2024.
- [19] J. Doornbos, Ö. Babur, and J. Valente, "Evaluating Generalization of Methods for Artificially Generating NDVI from UAV RGB Imagery in Vineyards," *Remote Sensing*, vol. 17, no. 3, p. 512, February 2025.
- [20] L. F. Lopes, F. S. Dias, P. M. Fernandes, and V. Acácio, "A remote sensing assessment of oak forest recovery after postfire restoration," *European Journal of Forest Research*, vol. 143, no. 3, pp. 1001–1014, March 2024.
- [21] A. M. Khutuev, A. Kh. Zanirov, D. A. Tutukova, and I. Yu. Savin, "NDVI of crops as a remote indicator of arable soils quality," *Dokuchaev Soil Bulletin*, no. 121, pp. 70–85, December 2024.
- [22] R. Prăvălie et al., "NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018," *Ecological Indicators*, vol. 136, p. 108629, February 2022.

- [23] M. T. Bhatti, H. Gilani, M. Ashraf, M. S. Iqbal, and S. Munir, "Field validation of NDVI to identify crop phenological signatures," *Precision Agriculture*, vol. 25, no. 5, pp. 2245–2270, July 2024.
- [24] S. Xu, D. Wang, S. Liang, Y. Liu, and A. Jia, "Assessment of gridded datasets of various near surface temperature variables over Heihe River Basin: Uncertainties, spatial heterogeneity and clear-sky bias," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 120, p. 103347, May 2023.
- [25] S. Ehsan and D. Kazem, "Analysis of land use-land covers changes using normalized difference vegetation index (NDVI) differencing and classification methods," *African Journal of Agricultural Research*, vol. 8, no. 37, pp. 4614–4622, September 2013.
- [26] B. Mishra and T. B. Shahi, "Deep learning-based framework for spatiotemporal data fusion: an instance of Landsat 8 and Sentinel 2 NDVI," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 15, no. 03, September 2021.
- [27] S. Desai, M. Mattoo, A. M. Deshpande, A. Dey, and S. Akiwate, "Vegetation change detection through NDVI analysis using Landsat-8 data," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computing, Communication, and Information Technology (C3IT)*, Adisaptagram, Kolkata, India, March 9–10, 2024, pp. 1–6.
- [28] S. Eskandari and S. K. Bordbar, "Provision of land use and forest density maps in semi-arid areas of Iran using Sentinel-2 satellite images and vegetation indices," *Advances in Space Research*, vol. 75, no. 3, February 2025.
- [29] F. Ghilardi, S. De Petris, V. Torti, C. Giacomini, and E. Borgogno-Mondino, "A possible role of NDVI time series from Landsat Mission to characterize lemurs habitats degradation in Madagascar," *The Science of the Total Environment*, vol. 974, p. 179243, March 2025.
- [30] R. G. Congalton and K. Green, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019.
- [31] Z. Zhu and C. E. Woodcock, "Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 118, pp. 83–94, December 2011.
- [32] S. Foga et al., "Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products," *Remote Sensing of Environment*, vol. 194, pp. 379–390, April 2017.
- [33] Z. Zhu, S. Wang, and C. E. Woodcock, "Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images," *Remote Sensing of Environment*, vol. 159, pp. 269–277, January 2015.
- [34] U.S. Geological Survey, "Landsat Surface Reflectance" [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-reflectance>. (Accessed: October 23, 2024).

- [35] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, July 2017.
- [36] Forest Research and Development Office, "*Forestry in Thailand*" [Online]. Available: <https://forprod.forest.go.th/forprod/ebook/การป่าไม้ในประเทศไทย/Forest%20in%20thailand%20eng.pdf>. (Accessed: April 14, 2025).
- [37] NASA, "*Landsat Satellites*" [Online]. Available: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>. (Accessed: May 14, 2025).

การลดต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี Reducing Life Cycle Costs of Bucket Elevator in Fertilizer Production Plant

มีน อังคุโชติ¹ และ สมหญิง งามพรประเสริฐ^{2*}

^{1,2}หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

Meen Angsuchoti¹ and Somying Ngarnpornprasert^{2*}

^{1,2}Master of Engineering Program in Engineering Management
College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University
somying.ngt@dpu.ac.th

Received 25 February 2025

Revised 01 June 2025

Accepted 27 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี โดยการนำแผนภูมิพาเรโตและกระบวนการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) มาใช้เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหา จากนั้นทำงานวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาโดยใช้หลักการ Why-Why Analysis พบว่าสาเหตุหลักที่แท้จริงของปัญหาคือ ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงนั้นมียอายุการใช้งานที่สั้นกว่าปกติเนื่องจากการโดนกัดกร่อนจากวัสดุที่ใช้นั่นเอง นำมาสู่การแก้ปัญหาโดยการออกแบบเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงและเปลี่ยนวัสดุทำสายพานของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงใหม่ พบว่าสามารถลดค่าความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) จากเดิมที่อยู่ในเกณฑ์สูง จำนวน 3 อาการ, เกณฑ์ปานกลางจำนวน 4 อาการ และ เกณฑ์ต่ำจำนวน 9 อาการ ให้อยู่ในเกณฑ์ปานกลางจำนวน 6 อาการ และ เกณฑ์ต่ำจำนวน 7 อาการ หลังทำการปรับปรุง นอกจากนี้ผู้ทำการวิจัยยังได้เปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงก่อนและหลังทำการปรับปรุงพบว่า ต้นทุนวงจรชีวิต (Life Cycle Cost: LCC) ของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงลดลงจาก 9,336,313 บาท เป็น 4,961,279 บาท หรือคิดเป็น 53.14% ของต้นทุนวงจรชีวิตเดิม และ เมื่อทำการคิดค่าความไว (Sensitivity Analysis) ของต้นทุนวงจรชีวิตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายต่างๆ ยังพบว่ามีต้นทุนวงจรชีวิตที่ต่ำกว่าเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงก่อนทำการปรับปรุง

คำสำคัญ: กระพ้อลำเลียง, กระบวนการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ, Why-Why Analysis, ต้นทุนวงจรชีวิต

Abstract

The objective of this research was to reduce the life cycle cost (LCC) of the bucket elevator in a chemical fertilizer plant. The study utilized a Pareto Chart and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) to identify and prioritize problems. The root causes of the issues were determined through a Why-Why Analysis, which showed that the conveyor parts had a short service life due to corrosion from the conveyed materials. To solve this, a new bucket elevator was designed, and the materials of the conveyor parts were changed. After the improvements, the Risk Priority Number (RPN) decreased, with the number of issues in the high, medium, and low-risk categories being reduced from three, four, and nine issues to zero, six, and seven issues, respectively. Additionally, the life cycle cost of the system was reduced from 9,336,313 THB to 4,961,279 THB, representing a 53.14% decrease. Furthermore, when calculating the Sensitivity Analysis of the life cycle costs with varying expenses, it was found that the life cycle cost of the new design bucket elevator was lower than that of the old bucket elevator.

Keywords: Bucket Elevator, FMEA, Why-Why Analysis, Life Cycle Cost

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ธุรกิจการผลิตและนำเข้าปุ๋ยเคมีเผชิญกับการแข่งขันที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตลาดที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลที่ได้รับการจดทะเบียนกับกรมพัฒนาธุรกิจในเดือนมิถุนายน 2565 พบว่ามีผู้ผลิตปุ๋ยเคมีในประเทศถึง 1,016 ราย ซึ่งเพิ่มขึ้น 26% เมื่อเปรียบเทียบกับสิ้นปี 2564 การขยายตัวนี้สะท้อนถึงความต้องการปุ๋ยเคมีที่สูงขึ้นจากภาคเกษตรกรรม และ ความพยายามของผู้ผลิตในการตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ราคาของวัตถุดิบหลักในการผลิตปุ๋ยเคมี เช่น Diammonium phosphate (DAP), Muriate of potash (MOP) และ Urea กำลังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามแนวโน้มราคาน้ำมันและก๊าซธรรมชาติที่ปรับตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ ความขัดแย้งระหว่างประเทศรัสเซีย-ยูเครน ซึ่งรัสเซียเป็นผู้ส่งออกปุ๋ยและวัตถุดิบหลักอันดับหนึ่งของโลก [1] ส่งผลให้ต้นทุนการนำเข้าสูงขึ้นและสร้างแรงกดดันต่อผู้ผลิตในประเทศ

นอกจากนี้ปัญหาที่พบบ่อยภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี คือการชำรุดจากการผุกร่อนของโครงสร้างเครื่องจักร โดยเฉพาะเครื่องจักรที่ใช้ชิ้นส่วนที่ผลิตจากเหล็ก และ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีความกัดกร่อนและความชื้นสูง เช่น Urea ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนและโครงสร้างเครื่องจักรในระยะเวลานานขึ้น โดยในสายการผลิตปุ๋ยเคมีนั้นมีการใช้เครื่องจักรประเภทกระพ้อลำเลียงจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่ในการขนถ่ายวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์จากที่ต่ำขึ้นไปยังที่สูง เครื่องจักรกระพ้อลำเลียงนี้มีชิ้นส่วนหลักประกอบไปด้วยโซ่ลำเลียง (Conveyor chain) และ ลูกกระพ้อ (Bucket) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีราคาสูงที่สุดคิดเป็น 40% ของราคาเครื่องจักรกระพ้อลำเลียง และผลิตมาจากเหล็กนั้นจะเกิดการผุกร่อนอย่างรวดเร็วโดยอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน Conveyor chain อยู่ที่ 11.11% ของความหนาเดิมต่อปี ผลที่ตามมาคือ ต้นทุนในการซ่อมแซมสูงขึ้นเนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร

บ่อยครั้งและเร็วขึ้นกว่าปกติเพื่อป้องกันการเกิดการขัดข้องระหว่างการผลิต ทำให้ต้นทุนด้านการผลิตและซ่อมบำรุงสูงขึ้นเนื่องจากเครื่องจักรไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างเช่น การรั่วของ Bucket ซึ่งทำให้ไม่สามารถขนถ่ายวัสดุได้อย่างเต็มที่ เป็นต้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมลดลง การลดต้นทุนการผลิตจึงมีความสำคัญมากในสถานะที่ต้นทุนต่างๆ สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การซ่อมบำรุงเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพนั้นเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และสามารถรักษาผลกำไรได้ในขณะที่ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

ผู้วิจัยในฐานะผู้รับผิดชอบด้านการออกแบบและปรับปรุงเครื่องจักรที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิต มีความมุ่งมั่นที่จะวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องจักรเหล่านี้ และนำทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแก้ไขเครื่องจักรที่ก่อความเสี่ยง เพื่อลดต้นทุนวงจรชีวิตให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการลดต้นทุนรวมในการผลิต ทำให้สามารถแข่งขันในตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรที่ก่อความเสี่ยง
- 2.2 เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรที่ก่อความเสี่ยง

3. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาพและรายละเอียดของเครื่องจักรที่ก่อความเสี่ยงในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี จากบันทึกงานซ่อมแผนกวิศวกรรมเครื่องกลในช่วงระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2564 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2567

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart)

แผนภูมิพาเรโตเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้กราฟแท่งและกราฟเส้นร่วมกัน โดยกราฟแท่งจะใช้ในการแสดงปริมาณของข้อมูล โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ส่วนกราฟเส้นจะบ่งชี้เปอร์เซ็นต์สะสมของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งช่วยให้เรามองเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ปัญหาหรือข้อบกพร่องในเครื่องจักรใดที่ควรได้รับการแก้ไขเป็นลำดับแรก เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการปรับปรุงกระบวนการผลิต [2]

4.2 กระบวนการวิเคราะห์ Why – Why

กระบวนการวิเคราะห์ Why – Why เป็นเครื่องมือคุณภาพที่ใช้ในการหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา โดยการตั้งคำถามว่า 'ทำไม' ซ้ำๆ ไปเรื่อย ๆ จนสามารถระบุสาเหตุหลักของปัญหาได้อย่างชัดเจน กระบวนการนี้ช่วยให้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง และทำให้เราเข้าใจขั้นตอนการเกิดปัญหานั้นๆ อย่างเป็นระบบ เพื่อการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน" [3]

4.3 ต้นทุนวงจรชีวิต (Life Cycle Cost: LCC)

ต้นทุนวงจรชีวิตเป็นแนวทางที่ครอบคลุมซึ่งจะพิจารณาด้านต้นทุนทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสินทรัพย์นั้น ๆ ตลอดอายุการใช้งาน โดยการสำรวจองค์ประกอบต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน และหาวิธีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดและลดค่าใช้จ่ายให้เหลือน้อยที่สุด [4]

4.4 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA)

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการทำงานและการออกแบบ เพื่อระบุข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นและผลกระทบที่ตามมา และจัดลำดับความสำคัญในการป้องกันความเสี่ยงเหล่านั้นอย่างมีประสิทธิภาพ [5]

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุพัฒน์ วงศ์จิรวิธิตถิการ และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน [5] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของโรงงานผลิตเพลารถยนต์ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) และใช้แผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาพบว่าค่า MTBF ของเครื่องจักร สูงขึ้นจากเดิม 83 ± 45 ชั่วโมงต่อครั้งเป็น 87 ± 22 ชั่วโมงต่อครั้ง และมีค่า MTTR ลดลงจาก 84.70 ± 32.57 ชั่วโมงต่อครั้ง เป็น 70.38 ± 33 ชั่วโมงต่อครั้ง

รัฐภูมิ วงษ์วิทย์ [6] ได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) ของเครื่องจักรภายในโรงงานผลิตภัณฑ์คอนกรีต และสร้างเกณฑ์การให้คะแนนของผลกระทบต่างๆเพื่อนำมาคำนวณค่าความเสี่ยง (RPN) ของเครื่องจักรจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการใช้เครื่องมือ Why-Why Analysis เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของรูปแบบปัญหาที่มีความเสี่ยงสูงและแก้ไข้ปัญหา ส่งผลให้จำนวนครั้งในการหยุดใช้งานเครื่องจักรที่ต้องใช้เวลาซ่อมมากกว่า 1 วัน ลดลง 85% ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย (MTBF) เพิ่มขึ้น 27% เวลาเฉลี่ยของการซ่อมเครื่องจักรลดลง 45%

มนตรี เจนชัย [7] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสาเหตุของการเกิด Breakdown ในระบบอัดอากาศของโรงงานผลิตน้ำดื่ม โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ Why – Why เพื่อหาสาเหตุของปัญหา และ แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหา และทำการแก้ไขจากสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำให้สามารถลดอัตราการเกิด Breakdown พบว่า เครื่องอัดอากาศจากเดิม 5.3 ครั้งต่อเดือน หลังการปรับปรุงมีอัตราการชำรุดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.0 ครั้งต่อเดือน ลดลง 81.13%

บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์ และ พิพัฒน์ เลิศโกวิทย์ [8] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อทำการลดต้นทุนโดยนำเครื่องมือ 7 QC Tools, ECES และ Why-Why Analysis มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาสภาพของปัญหาและสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาคือขั้นตอนการผลิตที่เกินความจำเป็นทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 42.03 บาทต่อชิ้น และ ใช้เวลาในการผลิตลดลงจาก 7 ขั้นตอน เหลือเพียง 4 ขั้นตอน

วราภรณ์ กลิ่นบุญ, รัฐธรรมนูญ ยอดแสง, นที สุโขทัย และ จิระพล กลิ่นบุญ [9] ได้ทำการศึกษาการออกแบบเครื่องพ่นทรายเพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตหม้อพักไอเสียรถจักรยานยนต์โดยใช้ Why-Why Analysis วิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา และใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงการและออกแบบเครื่องจักรใหม่ทำงานพบว่าสามารถลดเวลาในการทำงานลงได้ 70 วินาที และลดจำนวนพนักงานที่ใช้ในการผลิตได้จำนวน 2 คน

ประภาพร พลแสง, อภิศักดิ์ หาญพิชาญชัย, ประเมศวร์ เบ้าวรรณ, ปัญญา วินทะไชย และ ปรวิทย์ เจียนดอน [10] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงและป้องกันของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนซีลขอบกระจกอร์ถยนต์โดยใช้เครื่องมือ 7 QC Tools ร่วมกับเครื่องมือ Why-Why Analysis พบว่าสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาคือ แม่พิมพ์เกิดการอุดตันจึงดำเนินการแก้ไขโดยการจัดทำคู่มือการใช้งานเครื่องจักรและการล้างแม่พิมพ์พบว่าสามารถลดของเสียได้ถึง 56.06%

ภาสิทธิ เต็มดวงค์ [11] ได้ทำการออกแบบโมเดลต้นทุนวงจรชีวิต และทำการเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของรถจักรยานยนต์ 3 ประเภท ได้แก่ ไฟฟ้า, ไฮบริด และ แก๊สโซลีนขนาดความจุไม่เกิน 150 ซีซี ในช่วงอายุ 5 ปี พบว่า

ต้นทุนวงจรชีวิตของรถจักรยานยนต์ Honda Wave ICEs มีต้นทุนตลอดอายุการใช้งานต่ำสุดที่ 4.65 บาทต่อกิโลเมตร และมีค่าใช้จ่ายรวม 111,566.23 บาทตลอดอายุการใช้งาน

ปริดา จันทวงษ์ [12] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบทดสอบระหว่างหลังคาทั่วไป (SRC) กับปล่องหลังคาโซลาร์เซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติร่วมกับพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง (RSCC) และวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิตพบว่าบ้านที่ติดตั้ง RSCC มีอุณหภูมิภายในห้องต่ำกว่าบ้านที่ติดตั้ง SRC ประมาณ $0.2 - 6^{\circ}\text{C}$ และมีระยะเวลาการคืนทุน 32.7 ปี พร้อมอัตราผลตอบแทนการลงทุน 37% ต่อปีจากการคิดอัตราดอกเบี้ยที่ 6% ทำให้ RSCC เป็นทางเลือกที่คุ้มค่าสำหรับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอนุรักษ์พลังงาน

สาวตรี ยุพเยาว์ [13] ได้ทำการศึกษาแนวทางการลดต้นทุนของกระบวนการผลิตน้ำมะนาวบรรจุขวดพลาสติกใส ซึ่งนำเครื่องมือคุณภาพ 7 ชนิด คือ Why-Why Analysis และ 5W1H มาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสาเหตุของปัญหาพบว่า สาเหตุหลักมาจาก 4 ปัจจัย คือ คน, เครื่องจักร, วัตถุดิบ และ กระบวนการ หลังจากพบสาเหตุของปัญหาและทำการแก้ไขปัญหา พบว่า ปริมาณของเสียลดลง 5 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการตรวจรับวัตถุดิบเข้าคลังลดลง 43.77% และยังสามารถลดต้นทุนการดำเนินงานได้ถึง 43.50% ต่อปี

ธีร์ เขาวนทปัญญา [14] การทำการศึกษาการกักกรองในบรรยากาศของเหล็กกล้าโดยทำการนำเสนอภาพรวมของการกักกรองบนผิวของเหล็กกล้า และประยุกต์ใช้ Linear Bilogarithmic Laws เพื่อทำนายอัตราการกักกรองของเหล็กกล้าซึ่งทำให้เข้าใจกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กกล้าในบรรยากาศ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การศึกษากระบวนการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) รวมถึงการประยุกต์ใช้ 7 QC Tools และ Why-Why Analysis นั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อลดอัตราการชำรุด และลดเวลาในการซ่อมเท่านั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำแนวคิดดังกล่าวมาปรับใช้ในการปรับปรุงเครื่องจักรใหม่เพื่อลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรกระท่อกลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีให้ได้มากที่สุดตั้งแต่การเริ่มใช้งานเครื่องจนถึงการยกเลิกการใช้งาน โดยใช้ทฤษฎีต้นทุนวงจรชีวิตในการเปรียบเทียบต้นทุนทั้งหมดของเครื่องจักรก่อนและหลังการปรับปรุง และ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานในอุตสาหกรรม รวมถึงวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของต้นทุนวงจรชีวิตในกรณีที่ต้นทุนต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลง

6. การดำเนินการวิจัย

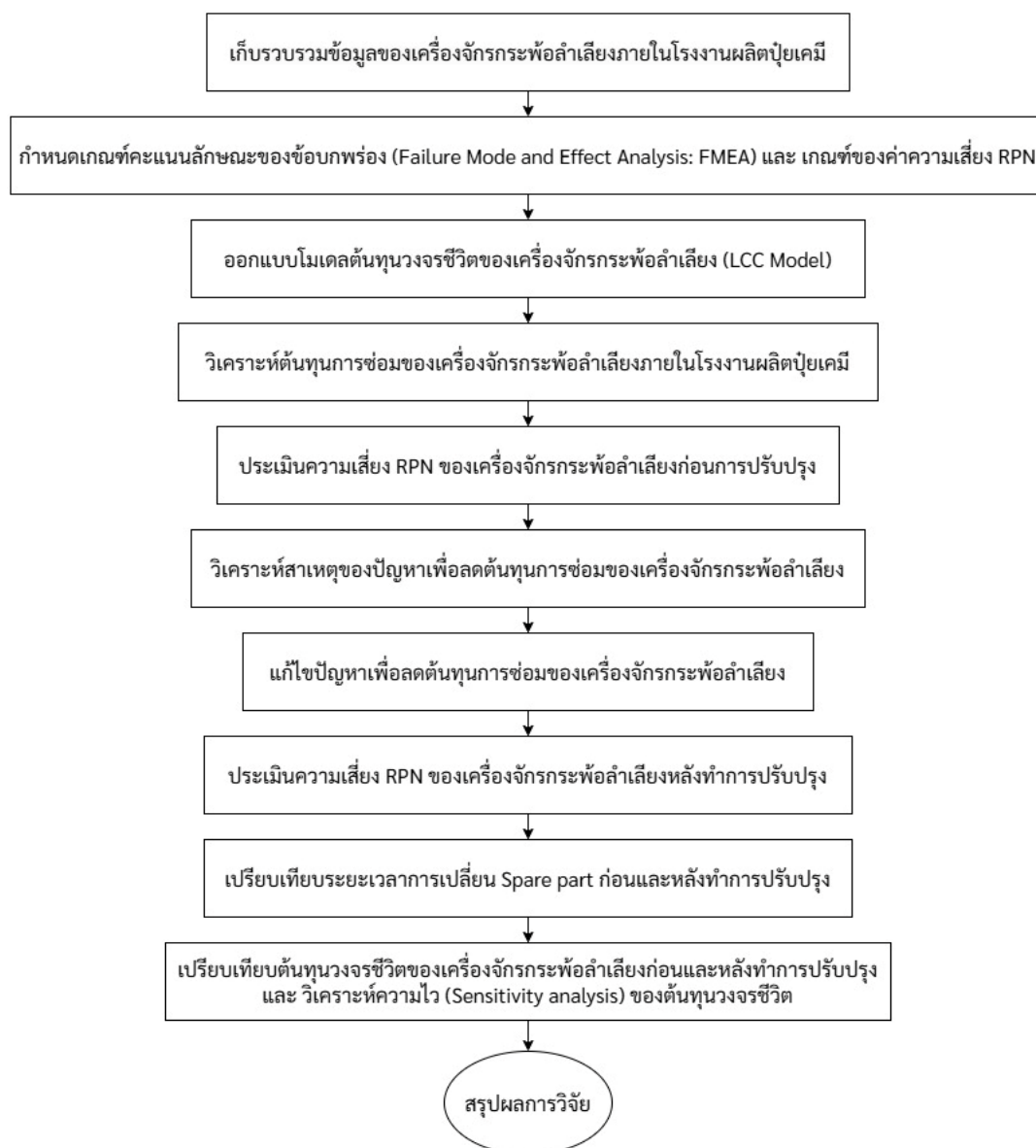
การดำเนินงานนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 1

6.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการนำข้อมูลของเครื่องจักรกระท่อกลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีเพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

6.1.1 รายละเอียดของเครื่องจักรกระท่อกลำเลียงชนิดโซ่ลำเลียง

เครื่องจักร BE เป็นเครื่องจักรกระท่อกลำเลียงชนิด Continuous bucket elevator ที่ใช้ Conveyor chain ในการลำเลียงวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดของเครื่องจักรดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 2 เครื่องจักร BE

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องจักร BE

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด
1	Machine	Chain bucket elevator
2	Type	Continuous bucket elevator
3	Material to be fed	Fertilizer Bulk density = 1 ton/m ³ Moisture = 1.0~1.5% Angle of repose = 35°~40° Temperature: AVG 60°C Grain size = 5~50 mesh
4	Capacity	Normal 60 ton/h Maximum 70 ton/h
5	Bucket	144 pcs
6	Center distance	Vertical = 27.3 m Horizontal = 3.7 m
7	Chain speed	22 m/min
8	Drive unit	Geared motor: 15 kW 6P 50Hz 33RPM
9	Roller chain	RS 140-2 NT55: Drive shaft RS 140-2 NT17: Motor
10	Conveyor chain & Sprocket	DK3090FS-2PG4 DK3090FS NT11
11	Plummer block	SN536
12	Bearing	Top: 22236 K + H 3136 Bottom: UCT 315
13	Chain guide	FB 75x9t
14	Casing	Plate SS41: 4.5 mm

6.1.2 อายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆภายในเครื่องจักรกะพ้อลำเลียงชนิดโซ่ลำเลียง

เครื่องจักร BE นั้นมีอายุการใช้งานโดยกำหนดรอบการเปลี่ยนชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องจักรจาก การเก็บข้อมูลภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีดังตารางที่ 2 และ ราคาของชิ้นส่วนของเครื่องจักรดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 อายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆภายในเครื่องจักรกระพ้อลำเลียง

ลำดับ	ชิ้นส่วน	อายุการใช้งาน (ปี)
1	Casing	12 ปี
2	Conveyor Chain	3 ปี
3	Roller Chain	6 ปี
4	Sprocket (Roller Chain)	6 ปี
5	Sprocket (Conveyor Chain)	12 ปี
6	Chain Guide	3 ปี
7	Buckets	3 ปี
8	Bearing	4 ปี
9	Drive Unit	12 ปี

ตารางที่ 3 ราคาของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร BE

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคา (บาท)
1	Conveyor chain	560 links	2621.5	1,468,040
2	Conveyor sprocket	2 sets	108,150	216,310
3	Roller chain	1 set	48,510	48,510
4	Sprocket (Roller chain)	1 set	4,494	4,494
5	Sprocket (Conveyor chain)	1 set	23,055	23,055
6	Chain guide	1 set	124,500	124,500
7	Bucket	144 pcs	1,500	216,000
8	Plumber block + Bearing (Top part)	2 sets	18,108	36,216
9	Bearing (Bottom part)	2 sets	5,431	10,862

6.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA)

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีได้ทำการกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงจาก 3 ปัจจัยดังนี้

- ระดับความรุนแรงปัญหา (Severity: S) คือ ระยะเวลาในการหยุดการผลิตจากอาการชำรุด
- โอกาสในการเกิดสาเหตุ (Occurrence: O) คือ ความถี่ในการเกิดอาการชำรุด
- ความสามารถในการตรวจจับ (Detection: D) คือ ความสามารถในการตรวจพบอาการชำรุด

ซึ่งเกณฑ์คะแนนของ ระดับความรุนแรงปัญหา โอกาสในการเกิดสาเหตุ ความสามารถในการตรวจจับ และเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีนั้น ได้มาจากการระดมความคิดของผู้เชี่ยวชาญของแผนกต่างๆ ภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีโดยอ้างอิงประวัติการซ่อมของเครื่องจักรภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี และกำหนดเป็น

ระเบียบปฏิบัติ (Procedure) ซึ่งระดับของคะแนนของแต่ละปัจจัยแสดงไว้ดังตารางที่ 4 และได้กำหนดเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงของเครื่องจักรกะพอลำเลียงในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 ไว้ดังตารางที่ 5

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

โดยที่	RPN	=	ค่าความเสี่ยง
	S	=	ระดับความรุนแรงปัญหา
	O	=	โอกาสในการเกิดสาเหตุ
	D	=	ความสามารถในการตรวจจับ

ตารางที่ 4 เกณฑ์การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA)

ระดับ คะแนน	ระดับความรุนแรงของ ปัญหา (Severity: S)	โอกาสในการเกิด สาเหตุ (Occurrence: O)	ความสามารถในการตรวจจับ (Detection: D)
10	หยุดการผลิตมากกว่า 7 วัน	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/วัน	สามารถตรวจพบหลังจากการชำรุดเกิดขึ้นด้วยการใช้เครื่องมือ
9	หยุดการผลิต 5-6 วัน	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/3วัน	สามารถตรวจพบหลังจากการชำรุดเกิดขึ้นด้วยการใช้สายตา
8	หยุดการผลิต 3-4 วัน	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/7วัน	สามารถตรวจพบหลังจากการชำรุดเกิดขึ้นระหว่างการหยุดผลิตด้วยการใช้เครื่องมือ
7	หยุดการผลิต 1-2 วัน	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/15วัน	สามารถตรวจพบหลังจากการชำรุดเกิดขึ้นระหว่างการหยุดผลิตด้วยการใช้สายตา
6	หยุดการผลิตมากกว่า 12 ชม.	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/เดือน	สามารถตรวจพบก่อนการชำรุดของเครื่องจักรได้ระหว่างการหยุดผลิตด้วยการใช้เครื่องมือ
5	หยุดการผลิตมากกว่า 6 ชั่วโมง	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/3เดือน	สามารถตรวจพบก่อนการชำรุดของเครื่องจักรได้ระหว่างการหยุดผลิตด้วยการใช้สายตา
4	หยุดการผลิตมากกว่า 1 ชั่วโมง	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/6เดือน	สามารถตรวจพบก่อนการชำรุดของเครื่องจักรได้ระหว่างการผลิตด้วยการใช้เครื่องมือ
3	หยุดการผลิตมากกว่า 30 นาที	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/ปี	สามารถตรวจพบก่อนการชำรุดของเครื่องจักรได้ระหว่างการผลิตด้วยการใช้สายตา
2	มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตแต่ยังดำเนินการผลิตได้	เกิดขึ้นอย่างน้อย 1 ครั้ง/3ปี	มีระบบอัตโนมัติในการตรวจจับและหยุดการชำรุดระหว่างดำเนินการผลิต
1	ไม่มีผลกระทบต่อการผลิต	แทบจะไม่เคยเกิดขึ้น	มีระบบอัตโนมัติในการแจ้งเตือนก่อนการชำรุด

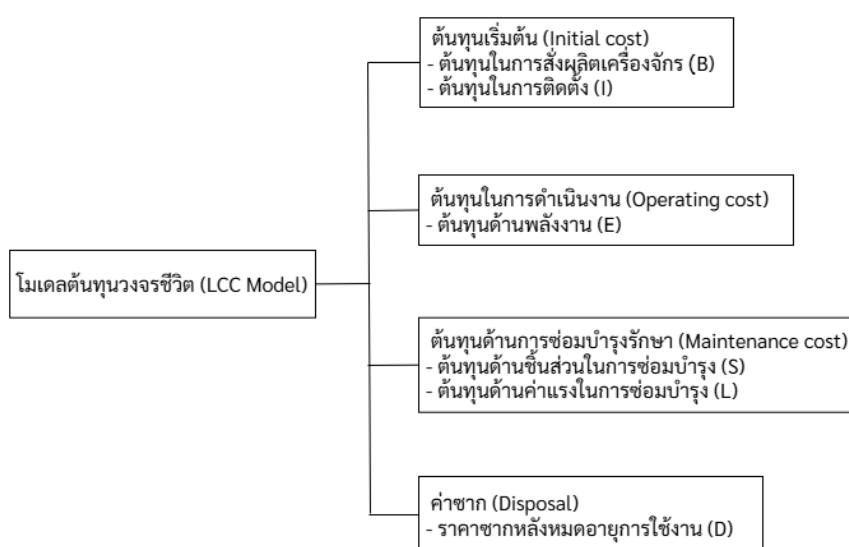
ตารางที่ 5 เกณฑ์ของค่าความเสี่ยงของเครื่องจักรภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี

คะแนน	ระดับความเสี่ยง
1 - 20	ต่ำ
21 - 80	ปานกลาง
> 81	สูง

6.3 การกำหนดโมเดลต้นทุนวงจรชีวิต (Life cycle cost: LCC)

การกำหนดโมเดลต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงตามรูปที่ 3 มีสมมติฐานในการกำหนดต้นทุนวงจรชีวิตที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ต้นทุนเริ่มต้น (Initial Cost) ประกอบไปด้วย ต้นทุนในการส่งผลิตและต้นทุนในการติดตั้งโดยนำข้อมูลมาจากใบเสนอราคาของผู้รับจ้าง
- ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating Cost) ประกอบไปด้วย ต้นทุนด้านพลังงานจากการคำนวณการใช้พลังงานจาก Drive Unit ของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียง
- ต้นทุนด้านการบำรุงรักษา (Maintenance Cost) ประกอบไปด้วย ต้นทุนด้านชิ้นส่วนในการซ่อมบำรุง และ ต้นทุนด้านค่าแรงในการซ่อมบำรุง ซึ่งประมาณการจากประวัติการซ่อมของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียง และเครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนใกล้เคียงกันภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี
- ค่าซาก (Disposal) คือ ต้นทุนในการขายซากชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรเมื่อหมดอายุการใช้งานโดยอ้างอิงจากประวัติการขายชิ้นส่วนของเครื่องจักร
- กำหนดให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งาน 12 ปี ตามประวัติการใช้งานของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียง
- กำหนดให้ม้อัดตราส่วนลด (Discount Rate) เท่ากับ 10% จาก อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ขั้นต่ำ (Minimum Overdraft Rate: MOR) ของธนาคารแห่งประเทศไทย 7.32% (ค่าเฉลี่ยของ MOR ณ มกราคม 2568 และผลตอบแทนที่บริษัทต้องการเพิ่มเติม 2.68%)
- ต้นทุนวงจรชีวิตสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2



รูปที่ 3 โมเดลต้นทุนวงจรชีวิต

$$LCC = (B + I) + E + (S + L) - D \quad (2)$$

โดยที่	LCC	=	ต้นทุนวงจรชีวิต (บาท)
	B	=	ต้นทุนในการผลิตเครื่องจักร (บาท)
	I	=	ต้นทุนในการติดตั้ง (บาท)
	E	=	ต้นทุนด้านพลังงาน (บาท)
	S	=	ต้นทุนด้านชิ้นส่วนในการซ่อมบำรุง(บาท)
	L	=	ต้นทุนด้านค่าแรงในการซ่อมบำรุง (บาท)
	D	=	ค่าซาก (บาท)

6.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทน (Maintenance Cost as A Percent of Replacement Asset Value: MC/RAV)

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนนั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 ซึ่งค่ามาตรฐานสากล (International Benchmarks) สำหรับอุตสาหกรรมทั่วไปจะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนน้อยกว่า 3% ตามมาตรฐาน SMRP Best Practices [15] และอุตสาหกรรมเคมีนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนเฉลี่ยอยู่ที่ 4% จากข้อมูลของสมาคมวิชาชีพของผู้เชี่ยวชาญด้านการบริหารจัดการทรัพย์สิน (Association of Asset Management Professionals: AMP) [16] เนื่องจากเครื่องจักรต้องบำรุงรักษาสูงกว่าเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมีภายในสายการผลิต

$$MC/RAV = (MC/RAV) \times 100 \quad (3)$$

โดยที่	MC/RAV	=	ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทน
	MC	=	ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อปี (บาท)
	RAV	=	มูลค่าทรัพย์สินทดแทน (บาท)

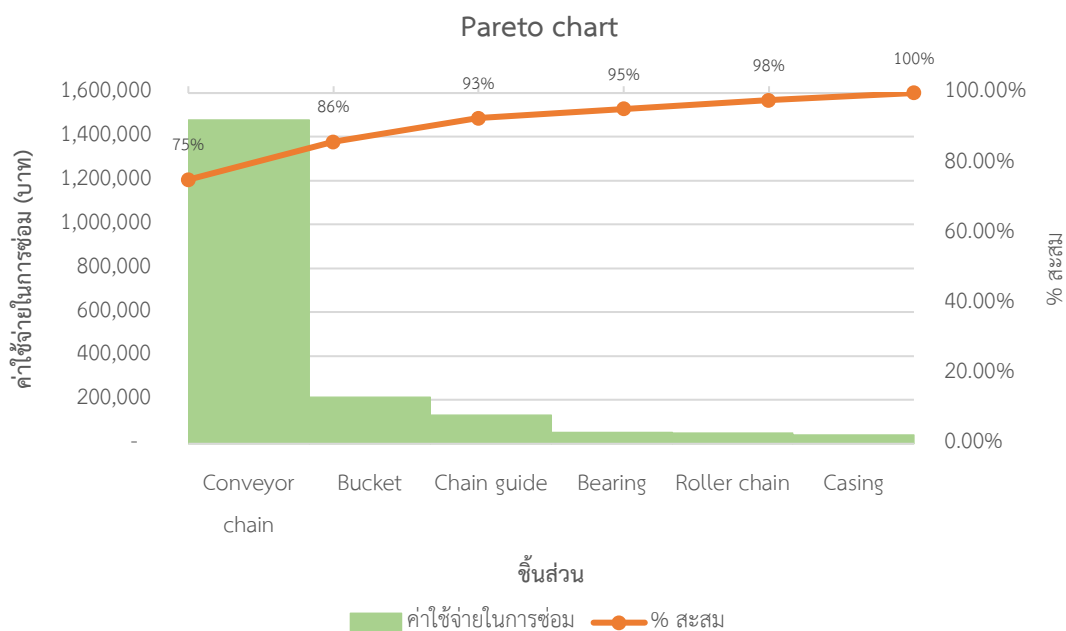
7. ผลการวิจัย

7.1 ต้นทุนในการซ่อมเครื่องจักรกระท่อลำเลียง

ทำการวิเคราะห์ต้นทุนในการซ่อมของเครื่องจักร BE โดยแสดงตัวอย่างของต้นทุนการซ่อมชิ้นส่วนตามตารางที่ 6 จากนั้นจึงใช้แผนภูมิพาเรโตเพื่อจัดลำดับต้นทุนในการซ่อมชิ้นส่วนต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าชิ้นส่วนที่มีค่าใช้จ่ายสูงตามหลัก 80:20 ได้แก่ Conveyor Chain และ Bucket

ตารางที่ 6 ตัวอย่างต้นทุนการซ่อมชิ้นส่วนของเครื่องจักร BE

รายการ	จำนวน	เวลาที่ใช้ (Man-hours)	ราคา Spare part (บาท)	จำนวน	ค่าใช้จ่าย Spare part (บาท)	ค่าแรง/ ชั่วโมง (บาท)	รวม ค่าแรง (บาท)	รวม (บาท)
เปลี่ยน Top bearing	2	30	18,108	2	36,216	86	2,580	38,796
เปลี่ยน Conveyor chain	1	160	1,468,040	1	1,468,040	86	13,760	1,481,800



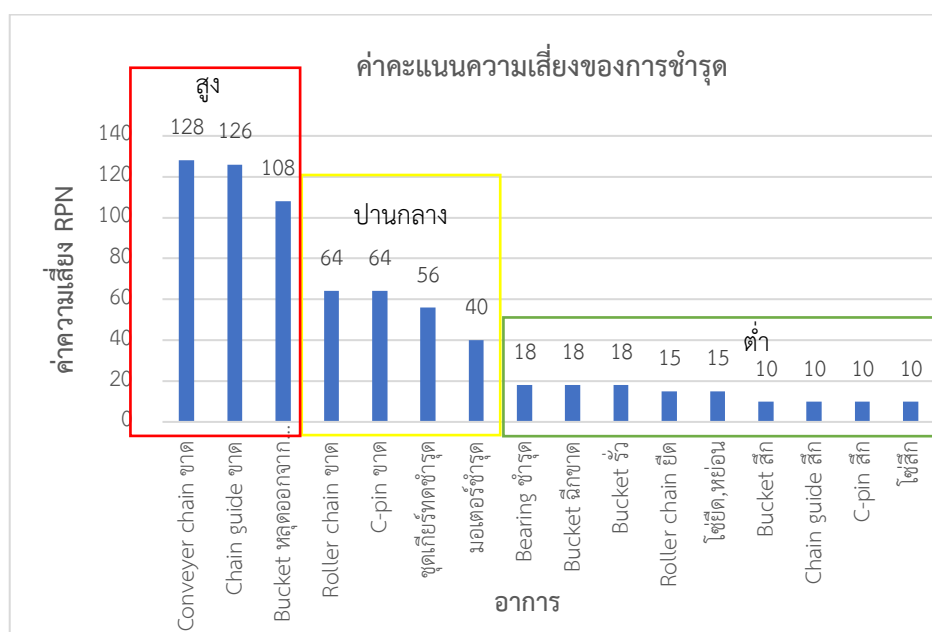
รูปที่ 4 แผนภูมิ Pareto แสดงต้นทุนการซ่อมแต่ละชิ้นส่วนของเครื่อง BE

7.2 ค่าความเสี่ยง (RPN : Risk Priority Number)

ค่าความเสี่ยง (RPN: Risk Priority Number) ของเครื่องจักร BE ก่อนทำการปรับปรุงจากการประเมินค่าความเสี่ยงดังแสดงในตารางที่ 7 ใช้เกณฑ์อ้างอิงตามตารางที่ 5 โดยสามารถแบ่งกลุ่มของอาการตามเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงของเครื่องจักรที่ก่อให้เกิดในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี พบว่า ชิ้นส่วนอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูงได้แก่ Conveyor chain, Chain guide และ Bucket ตามรูปที่ 5 โดยจะเห็นว่าชิ้นส่วน Conveyor chain, Chain guide และ Bucket นั้นมีความถี่ในการชำรุดมากกว่า 3 ปี แต่ถ้าหากเกิดการขาดระหว่างการดำเนินการผลิตจะมีระยะเวลาในการซ่อมที่ยาวนาน และ มีการตรวจจับที่ยากก่อนการชำรุดส่งผลให้อาการชำรุดของชิ้นส่วน Conveyor chain, Chain guide และ Bucket อยู่ในระดับความเสี่ยงสูง

ตารางที่ 7 คะแนนความเสี่ยง RPN ของเครื่องจักร BE ก่อนทำการปรับปรุง

ลำดับ	ชิ้นส่วน	อาการ	คะแนนความเสี่ยง			
			S	O	D	RPN
1	Conveyor chain	C-pin ขาด	4	2	9	64
		C-pin สึก	1	2	6	12
		โซ่ขาด	8	2	9	144
		โซ่ยืด,หย่อน	1	3	7	21
		โซ่สึก	1	2	7	14
2	Bucket	Bucket สึก	1	2	7	14
		Bucket รั่ว	2	3	3	18
		Bucket ฉีกขาด	2	3	3	18
		Bucket หลุดออกจากโซ่ลำเลียง	6	2	9	108
3	Chain guide	Chain guide สึก	1	2	5	10
		Chain guide ขาด	7	2	9	126
4	Roller chain	Roller chain ยืด	1	3	3	9
		Roller chain ขาด	3	2	9	54
5	Bearing	Bearing ขำรูด	2	2	4	16
6	Drive unit	มอเตอร์ขำรูด	5	2	4	40
		ชุดเกียร์ทดขำรูด	7	2	4	56



รูปที่ 5 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความเสี่ยง RPN ของการชำรุดของเครื่องจักร BE ก่อนทำการปรับปรุง

7.3 การวิเคราะห์สาเหตุเพื่อลดต้นทุนการซ่อม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการซ่อมบำรุงพบว่าต้นทุนด้านการซ่อมบำรุงในส่วน of Conveyor Chain, Chain Guide และ Bucket นั้นมีมูลค่าสูงเนื่องจากและจำเป็นต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนบ่อยเพื่อป้องกันการเกิด Break Down และ จากการประเมินความเสี่ยง FMEA ข้างต้น ซึ่งชิ้นส่วน Conveyor Chain, Chain Guide และ Bucket นั้นก็อยู่ในเกณฑ์ที่มีระดับความเสี่ยงสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงนำเครื่องมือ Why-Why Analysis มาวิเคราะห์พบว่าสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาคือวัสดุที่ใช้ในการขนถ่ายมีความสามารถในการกัดกร่อนสูง สภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง และการทำสีไม่ได้คุณภาพ ซึ่งแนวทางการแก้ปัญหาคือการปรับปรุงกระบวนการออกแบบใหม่โดยใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนมาใช้แทนแทนวัสดุเดิมตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์หาปัญหาและวิธีการแก้ไขปัญหาของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี

ปัญหา	Why 1	Why 2	Why 3	Why 4	แนวทางการแก้ปัญหา
ต้นทุนด้านการซ่อมบำรุงของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงมีมูลค่าสูง	เปลี่ยนชิ้นส่วนเครื่องจักรรอบ pm บ่อยเพื่อป้องกันการเกิด Break Down	Conveyor Chain มีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ (เมื่อเทียบกับสายการผลิตอื่น)	Conveyor Chain ถูกกัดกร่อนและขึ้นสนิม	วัสดุที่ใช้ในการขนถ่ายมีความสามารถในการกัดกร่อนสูงสภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง	เปลี่ยนมาใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและมีราคาไม่สูง
		Bucket มีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ (เมื่อเทียบกับสายการผลิตอื่น)	Bucket ถูกกัดกร่อนและขึ้นสนิม	วัสดุที่ใช้ในการขนถ่ายมีความสามารถในการกัดกร่อนสูงสภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง	เปลี่ยนมาใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและมีราคาไม่สูง
	ใช้เวลาในการซ่อมสูง	Conveyor Chain และ Bucket รื้อถอนและติดตั้งยาก	Spare Part ของเครื่องจักรมีน้ำหนักสูง	วัสดุที่ใช้เป็นหลัก	ปรับเปลี่ยนมาใช้ชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักน้อยและทนทาน
			Bolt & Nut ที่จุดยึดต่างๆโดนกัดกร่อนไม่สามารถขันออกได้	สภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง	ปรับปรุงกระบวนการออกแบบใหม่เพื่อป้องกันการซ่อม

7.4 การปรับปรุงเครื่องจักร BE หลังจากการวิเคราะห์ปัญหา

หลังจากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธี Why-Why Analysis ของเครื่องจักร BE นำมาสู่การปรับปรุงเครื่องจักรโดยเปลี่ยนลักษณะการขนถ่ายวัสดุจาก Continuous Bucket Elevator มาเป็น Centrifugal Bucket Elevator ซึ่งมีความเร็วรอบของการขนถ่ายวัสดุที่มากกว่าเดิม ดังรูปที่ 6 เพื่อลดขนาดของ Casing และ Bucket ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงโดยทำการเปลี่ยนวัสดุจาก Conveyor Chain มาเป็น Conveyor Belt ซึ่งทนต่อ

การกัดกร่อนและมีราคาต่ำกว่า Conveyor Chain และยังสามารถยกเลิกการใช้ Chain Guide เนื่องจากกระพ้อลำเลียงที่ใช้ Conveyor Belt นั้น ไม่จำเป็นต้องติดตั้ง Chain Guide นอกจากนี้การเปลี่ยนวัสดุของ Bucket จากเหล็กมาใช้ในลอนซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไปและมีราคาถูก ส่วนการเปลี่ยนใช้ Fluid Coupling นั้นเพื่อลดแรงกระชากในการออกตัวของเครื่องจักร โดยรายละเอียดเครื่องจักร BE แสดงดังตารางที่ 9 และอายุการใช้งานของชิ้นส่วนใหม่ดังแสดงในตารางที่ 10 ซึ่งอายุการใช้งานของ Conveyor Belt นั้นมีอายุการใช้งานที่น้อยกว่า Conveyor Chain อยู่ 1 ปี แต่มีราคาที่ต่ำกว่ามาก ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 9 รายละเอียดของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด
1	Machine	Belt Bucket Elevator
2	Type	Centrifugal Bucket Elevator
3	Material to be Fed	Fertilizer Bulk Density = 1 ton/m ³ Moisture = 1.0~1.5% Angle of Repose = 35°~40° Temperature: AVG 60°C Grain Size = 5~50 mesh
4	Capacity	Normal 60 ton/h, Maximum 75 ton/h
5	Bucket	150 pcs
6	Center Distance	Vertical = 29.35 m, Horizontal = 0 m
7	Belt Speed	84.84 m/min
8	Drive Unit	Geared Motor: 15 kW 6P 50Hz 45 RPM
9	Fluid Coupling	13 KRG
10	Pulley	Diameter 600 mm
11	Conveyor Belt	EP200 x 5PLY W500
12	Plummer Block	SN524
13	Bearing	Top: 22224 EAKE4 + H3124 Bottom: UCT 324
14	Chain Guide	-
15	Casing	Plate SS41: 4.5 mm

ตารางที่ 10 อายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

ลำดับ	ชิ้นส่วน	อายุการใช้งาน
1	Casing	12 ปี
2	Pulley	6 ปี
3	Conveyor Belt	2 ปี
4	Fluid Coupling	6 ปี
5	Buckets	2 ปี
6	Bearing	6 ปี
7	Drive Unit	12 ปี

ตารางที่ 11 ราคาของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ราคา (บาท)
1	Conveyor Belt	61 m	1,148	100,000
2	Pulley	2 pcs	60,000	120,000
3	Fluid Coupling	1 set	55,000	55,000
4	Shaft Coupling	1 set	43,000	43,000
5	Bucket	150 pcs	200	30,000
6	Plumber Block + Bearing (Top Part)	2 sets	20,000	40,000
7	Bearing (Bottom Part)	2 sets	14,000	28,000



รูปที่ 6 เครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

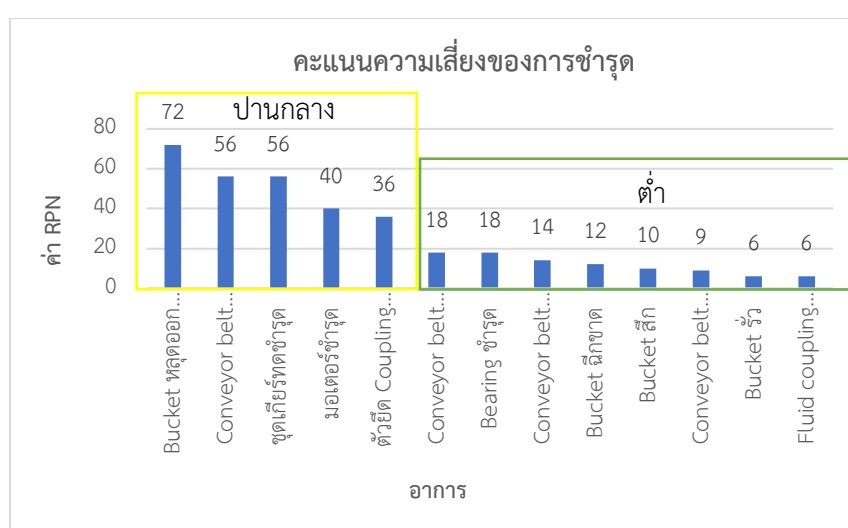
7.5 ค่าความเสี่ยง (RPN: Risk Priority Number) ของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

ค่าความเสี่ยงของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุงจากการประเมินค่าความเสี่ยงดังแสดงในตารางที่ 12

สามารถแบ่งกลุ่มของอาการตามเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงของเครื่องจักรกระท่อล้าเสี่ยงในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีไม่พบอาการที่มีความเสี่ยงสูงเนื่องจากชิ้นส่วน Conveyor Belt นั้นหากเกิดการขาดระหว่างการผลิตนั้นจะใช้เวลาในการซ่อมที่น้อยกว่า Conveyor Chain และ Bucket ในลอนนั้นหากเกิดการหลุดออกจากสายพานก็มีระยะเวลาในการซ่อมที่น้อยเช่นกัน

ตารางที่ 12 คะแนนความเสี่ยง RPN ของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

ลำดับ	ชิ้นส่วน	อาการ	คะแนนความเสี่ยง			
			S	O	D	RPN
1	Conveyor Belt	Conveyor Belt สึก	1	2	7	14
		Conveyor Belt หย่อน	1	3	3	9
		Conveyor Belt สไลด์	2	3	3	18
		สายพานขาด	7	1	9	56
2	Bucket	Bucket สึก	1	2	7	10
		Bucket รั่ว	2	1	3	6
		Bucket ฉีกขาด	2	2	3	12
		Bucket หลุดออกจากสายพาน	4	2	9	72
4	Coupling	Fluid Coupling น้ำมันรั่ว	2	1	3	6
		ตัวยึด Coupling ขาด	4	1	9	36
5	Bearing	Bearing ขำรูด	2	2	3	18
6	Drive Unit	มอเตอร์ขำรูด	5	2	4	40
		ชุดเกียร์ทดขำรูด	7	2	4	56



รูปที่ 7 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความเสี่ยง RPN ของการชำรุดของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุง

7.6 การเปรียบเทียบระยะเวลาต่อหน่วยในการเปลี่ยน Spare part ของเครื่องจักร BE

การเปรียบเทียบระยะเวลาต่อหน่วยในการเปลี่ยน Spare part ของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่าระยะเวลาในการเปลี่ยน Conveyor part ลดลงจาก 160 Man-hours เหลือเพียง 80 Man-hours และระยะเวลาในการเปลี่ยน Bucket ลดลงจาก 0.5 Man-hours เหลือเพียง 0.167 Man-hours ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ระยะเวลาต่อหน่วยในการเปลี่ยน Spare part ของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังการปรับปรุง

เครื่องจักร BE	ระยะเวลาต่อหน่วย			
	Conveyor chain/belt		Bucket	
	M x H	Man-hours	M x H	Man-hours
ก่อนปรับปรุง	5x32	160	2x0.25	0.5
หลังปรับปรุง	5x16	80	2x0.083	0.167

7.7 การเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE

การเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังทำการปรับปรุงพบว่า

- ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นลดลงจาก 4,024,020 บาท เหลือเพียง 2,284,275 บาท เนื่องจากชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร BE หลังการปรับปรุงนั้นมีราคาต่ำกว่าก่อนปรับปรุงมาก

- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีค่าเท่าเดิมคือ 2,152,445 บาทเนื่องจากการใช้ Drive unit ที่มีกำลังเท่าเดิมและขนถ่ายวัสดุด้วย Capacity เท่าเดิม

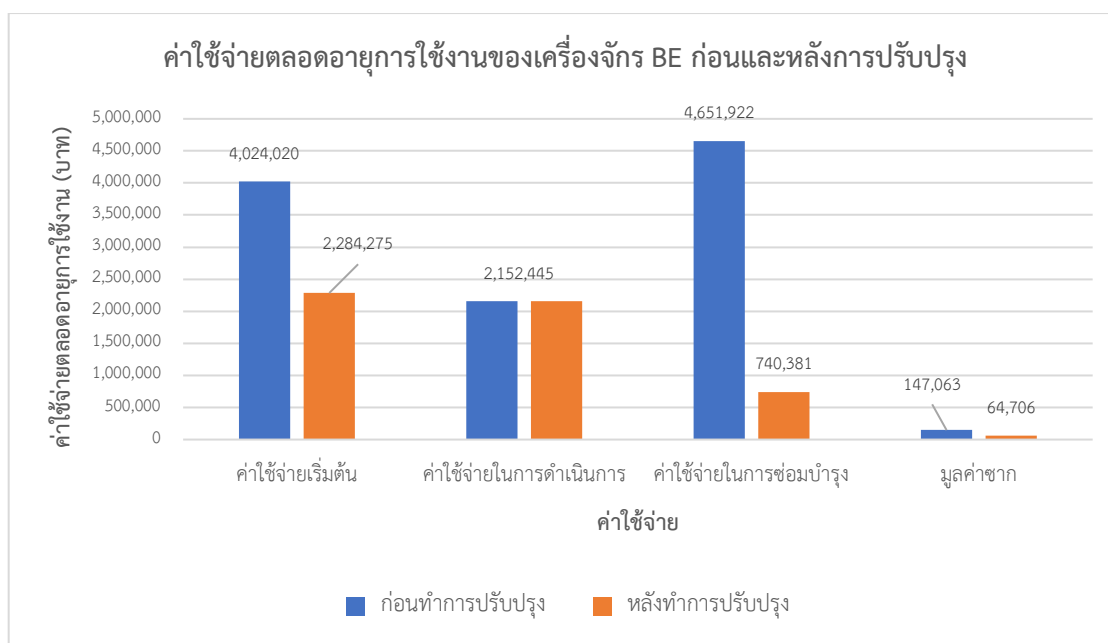
- ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลดลงจาก 4,651,922 บาท เหลือเพียง 740,381 เนื่องจากชิ้นส่วนที่ทำการเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงนั้นมีราคาน้อยลง และ ใช้เวลาในการซ่อมลดลง

- มูลค่าซากของเครื่องจักร BE นั้นมีค่าน้อยลง เพราะ Conveyor chain และ Bucket ก่อนการปรับปรุงนั้นสามารถขายในราคาของเหล็กได้

ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานลดลงจาก 9,336,313 บาท เหลือเพียง 4,961,279 บาท ดังแสดงในตารางที่ 14 และรูปที่ 8

ตารางที่ 14 ต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังการปรับปรุง (มูลค่าปัจจุบัน)

เครื่องจักร BE	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง (บาท)	มูลค่าซาก (บาท)	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (บาท)
ก่อนทำการปรับปรุง	4,024,020	2,152,445	4,651,922	147,063	9,336,313
หลังทำการปรับปรุง	2,284,275	2,152,445	740,381	64,706	4,961,279



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังทำการปรับปรุง

7.8 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทน (MC/RAV)
การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังการปรับปรุงนั้นมีค่าที่ลดลงเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทน (MC/RAV)
ของเครื่องจักร BE

เครื่องจักร BE	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี (บาท)	MC/RAV (%)
ก่อนทำการปรับปรุง	4,024,020	4,651,922	387,660	9.63
หลังทำการปรับปรุง	2,284,275	740,381	61,698	2.70

7.9 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE

การวิเคราะห์ความไวต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุงโดยตั้งสมมติฐานให้ ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น ค่าขึ้นส่วนของเครื่องจักรกระท่อลำเลียง ค่าแรง มูลค่าซาก แนะ อัตราเงินลด มีการเปลี่ยนแปลง จำนวน 6 สถานการณ์ และได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE หลังปรับปรุงในสถานการณ์ต่างๆ กับต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE หลังปรับปรุง ได้ค่าผลต่างดังแสดงในตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าต้นทุนต่างๆ ของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุงจะเพิ่มขึ้นต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุงก็ยังมีต้นทุนวงจรชีวิตที่ต่ำกว่าต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักรกระท่อลำเลียงก่อนทำการปรับปรุง

ตารางที่ 16 สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนวงจรชีวิต

สถานการณ์	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น	ค่าขึ้นส่วน	ค่าแรง	มูลค่าซาก	อัตราเงินลด	ต้นทุน วงจรชีวิต (บาท)	ผลต่าง (บาท)
1	+30%	-	-	-	-	5,646,561	685,282
2	-	+30%	-	-	-	5,123,824	162,545
3	-	-	+30%	-	-	4,968,811	7,532
4	-	-	-	-50%	-	4,972,902	11,623
5	-	-	-	-	-30%	5,400,233	438,954
6	+30%	+30%	+30%	-50%	-30%	6,297,472	1,336,193

8. สรุปผลการวิจัยและอภิปราย

จากการศึกษาข้อมูลและประวัติการซ่อมของเครื่องจักรกระท่อมลำเลียงภายในโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2564 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2567 และได้นำเครื่องมือคุณภาพ คือ แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) เพื่อหาปริมาณของต้นทุนการซ่อมของกระท่อมลำเลียงในแต่ละชิ้นส่วนพบว่าชิ้นส่วนที่มีต้นทุนการซ่อมสูงตามหลัก 80:20 ได้แก่ Conveyor Chain จำนวน 75%, Bucket จำนวน 11% จากนั้นได้วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) พบว่า ชิ้นส่วนที่มีค่าความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) อยู่ในเกณฑ์ที่สูงคือ Conveyor Chain, Bucket และ Chain Guide จำนวน 3 อาการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะออกแบบและปรับปรุงเพื่อลดต้นทุนในการซ่อมของชิ้นส่วน Conveyor Chain, Bucket และ Chain Guide ก่อนเป็นอันดับแรก

ในการแก้ปัญหานี้ผู้วิจัยได้ใช้หลักการ Why-Why Analysis มาใช้เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่า สาเหตุหลักของปัญหา คือ วัสดุที่ใช้ในการขนถ่ายมีความสามารถในการกัดกร่อนสูง และ สภาพแวดล้อมมีความชื้นสูง ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนดังกล่าวมีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ และ ใช้เวลาในการเปลี่ยนชิ้นส่วนสูง โดยการแก้ไขปัญหาคือ การออกแบบปรับปรุงเครื่องจักรโดยการนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาใช้แทนชิ้นส่วนเดิม และจัดทำมาตรฐานการทำสีใหม่สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่สามารถเปลี่ยนมาใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนได้จากการออกแบบปรับปรุงเครื่องจักร BE โดยเปลี่ยนจากการใช้ Conveyor Belt ในการลำเลียงวัสดุแทนการใช้ Conveyor Chain และ เปลี่ยนวัสดุของ Bucket โดยการใช้ Bucket ไนลอน แทน Bucket เหล็ก พบว่าสามารถลดค่าความเสี่ยงจากเดิมที่อยู่ในเกณฑ์สูง จำนวน 3 อาการ เกณฑ์ปานกลางจำนวน 4 อาการ และ เกณฑ์ต่ำจำนวน 9 อาการ มาเป็นอยู่ในเกณฑ์ปานกลางจำนวน 6 อาการ และ เกณฑ์ต่ำจำนวน 7 อาการ หลังทำการปรับปรุง และยังสามารถลดเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยน Spare Part ในชิ้นส่วน Conveyor Chain/belt ใช้เวลาดลดลง 50% และ Bucket ใช้เวลาดลดลง 66.67%

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบเครื่องจักร BE ก่อนและหลังปรับปรุง

เครื่องจักร BE	จำนวนอาการตาม เกณฑ์ค่าความ เสี่ยง (RPN)			ระยะเวลาในการเปลี่ยน ชิ้นส่วน (Man-hours)		ต้นทุนการ ซ่อมตลอด อายุการใช้ งาน (บาท)	ต้นทุน วงจรชีวิต (บาท)	MC/RAV
	สูง	ปาน กลาง	ต่ำ	Conveyor chain/belt	Bucket			
ก่อนปรับปรุง	3	4	9	160	0.5	4,651,922	9,336,313	9.63
หลังปรับปรุง	-	6	7	80	0.167	740,381	4,961,279	2.70

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE ก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่าค่าใช้จ่ายเริ่มต้นลดลงจาก 4,024,020 บาท เป็น 2,284,275 บาท คิดเป็น 43.24% ของค่าใช้จ่ายเริ่มต้นที่สามารถลดได้ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดอายุการใช้งานมีจำนวนเท่ากันคือ 2,152,445 บาท เนื่องจากมีการใช้ Drive Unit เท่ากันและมี Capacity เท่าเดิม ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตลอดอายุการใช้งานลดลงจาก 4,651,922 บาท เหลือเพียง 740,381 บาท คิดเป็น 84.08% ของต้นทุนการซ่อมที่สามารถลดได้ แต่มูลค่าซากนั้นมีจำนวนลดลงจาก 147,063 บาท เหลือเพียง 64,706 บาท คิดเป็น 44% ของมูลค่าซากก่อนทำการปรับปรุง และ ต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE ลดลงจาก 9,336,313 บาท เหลือ 778,026 บาทต่อปี เป็น 4,961,279 บาท เหลือ 413,440 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 53.14% ของต้นทุนวงจรชีวิตเดิม และยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนลดลงจาก 9.63% เหลือเพียง 2.7% ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานสากลของเครื่องจักรภายในอุตสาหกรรมเคมี นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความไวของต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE พบว่า ถึงแม้ต้นทุนต่างๆ ของเครื่องจักร BE หลังทำการปรับปรุงจะปรับสูงขึ้นก็ยังมีความน้อยกว่าต้นทุนวงจรชีวิตของเครื่องจักร BE ก่อนทำการปรับปรุง

จากการวิจัยดังกล่าว ได้มีการนำข้อมูลของเครื่องจักรมาวิเคราะห์โดยใช้ 7 QC Tools, Why-Why Analysis และ วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ เพื่อวิเคราะห์ปัญหาอย่างครอบคลุม และ ดำเนินการแก้ไขปัญหาดังตั้ง กระบวนการออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและการซ่อมบำรุง และประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความไวเพื่อประเมินผลอย่างครอบคลุม ต่างจากงานวิจัยก่อนๆ ที่เป็นการแก้ปัญหาเฉพาะจุด โดยผลของการปรับปรุงเครื่องจักร BE นั้น อยู่ในระดับที่น่าพอใจเนื่องจากต้นทุนวงจรชีวิตและค่าความเสี่ยงของเครื่อง BE หลังปรับปรุงลดลงแล้ว และ เครื่องจักร BE ยังสามารถใช้งานในสายการผลิตได้ด้วยเงื่อนไขการผลิตเดิม ไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นเปอร์เซ็นต์ของมูลค่าทรัพย์สินทดแทนลดลงจาก 9.63% เหลือเพียง 2.7% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของมาตรฐานสากลของเครื่องจักรภายในอุตสาหกรรมเคมี

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 ข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา

- เครื่องจักรกระพ้อลำเลียงที่ใช้ Conveyor Belt นั้นไม่เหมาะกับวัสดุขนถ่ายที่มีความชื้นสูงเนื่องจากจะทำให้เกิดการ Slip ของ Conveyor Belt ทำให้เครื่องจักรกระพ้อลำเลียงทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพการใช้วัสดุซึ่งสามารถแก้ไขโดยการลดความชื้นของวัสดุขนถ่ายก่อนการขนถ่ายโดยเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงที่ใช้ Conveyor Belt

- การวางแผนการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรตามรอบเวลาเพื่อป้องกันการเกิดการชำรุดนั้นควรกำหนดให้มีความเหมาะสมซึ่งถ้าหากเปลี่ยนชิ้นส่วนถี่เกินไปอาจจะทำให้ต้นทุนการซ่อมโดยรวมสูงขึ้นได้ซึ่งการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเช่นโปรแกรม CMMS เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผล ทำให้สามารถกำหนดอายุการใช้งานชิ้นส่วนของเครื่องจักรให้มีความแม่นยำมากขึ้น

9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

- การศึกษาเพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงนั้นมีส่วนในการลดต้นทุนวงจรชีวิตเช่นเดียวกันเนื่องจากต้นทุนด้านพลังงานของเครื่องจักรกระพ้อลำเลียงนั้นคิดเป็น 43% ของต้นทุนชีวิตหลังจากการปรับปรุง

- เครื่องจักรกระพ้อลำเลียงหลังปรับปรุงยังมีส่วน Casing ที่ยังใช้วัสดุเหล็กควรศึกษาต่อยอดเพื่อหาวัสดุแทนเพื่อลดต้นทุนการซ่อมในชิ้นส่วนนี้ เช่นการใช้วัสดุ SUS304 แทนการใช้วัสดุเหล็ก แต่ต้องคำนึงถึงต้นทุนโดยรวมด้วยเพราะวัสดุ SUS304 นั้นมีราคาสูงกว่าเหล็กมาก

- การศึกษาเทคโนโลยีการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ด้วย AI (AI Predictive Maintenance) เพื่อกำหนดช่วงเวลาในการบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้สามารถลดต้นทุนจากการบำรุงรักษาด้วยความถี่ของการซ่อมบำรุงที่เหมาะสมได้

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีต้องขอบคุณฝ่ายวิศวกรรมเครื่องกล และ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] นรินทร์ ต้นไพบูลย์, “แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2566-2568 อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี,” [ออนไลน์]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/chemicals/chemical-fertilizers/io/io-chemical-fertilizers-2023-2025>. (เข้าถึงเมื่อ: 13 ตุลาคม 2567).
- [2] เรื่องลักษณะ บุตรเพชร, จุฑาวรรณ อันสุพรรณ และ ชิดาเตียว มยุรีสุวรรณ, “เครื่องมือควบคุม คุณภาพ 7 ชนิด 7 Quality Control Tools,” [ออนไลน์]. Available: <https://postgrads.mfu.ac.th/wp-content/uploads/2022/12/6251209260.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ: 24 พฤศจิกายน 2567).
- [3] โอกระ อีโตชิ, *Why-Why Analysis เทคนิคการวิเคราะห์ห้อย่างถึงแก่นเพื่อปรับปรุงสถานประกอบการ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- [4] ปิยวัฒน์ บุญเยี่ยม, “การวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิตของรถยนต์ประหยัดพลังงานมาตรฐานสากลในประเทศไทย,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร, 2562.
- [5] สุพัฒน์ วงศ์จิรฐิติกาล และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน, “การปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของโรงงานผลิตเพลารถยนต์ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 643-653, กันยายน-ธันวาคม, 2556.
- [6] R. Vongvit, “Development of maintenance systems by Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) techniques: a case study of concrete products industry,” *Journal of Engineering and Innovation*, vol. 16, no. 3, pp. 59-69, July-September. 2023. [Online].

- https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/eng_ubu/article/view/246815/169271 (Accessed: October 12, 2024).
- [7] มนตรี เจนชัย, “การลดอัตราการชำรุดของเครื่องอัดอากาศ กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำดื่มในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา,” สารนิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร, 2565.
- [8] บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์ และ พิพัฒน์ เลิศโกวิทย์, “การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อทำการลดต้นทุน,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 44-59, มกราคม-มิถุนายน, 2564.
- [9] W. Klinbun, R. Yadseang, N. Suchaisong and J. Klinbun, “Design of Sandblasting Machine to Reduce Waste in the Production of Motorcycle Exhaust Muffler,” *The Journal of Manufacturing & Management Technology*, vol. 3, no. 2, July-December. 2024. [Online]. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/258961/174043> (Accessed: January 24, 2025).
- [10] P. Phonsaeng, A. Harnpicharnchai, P. Baowan, P. Wintachai and P. Jiandon, “The Improving and Defect Prevention in Production Process of Car Window Trim Seal Parts Case study: Company for Plastic Components,” *The Journal of Manufacturing & Management Technology*, vol. 3, no. 2, July-December. 2024. [Online]. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/260044/174042> (Accessed: January 28, 2025).
- [11] ภาลิทธิ เต็มวงศ์, “การศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนวงจรชีวิตของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ไฮบริดไฟฟ้า และ แก๊สโซลีน ในประเทศไทย,” สารนิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร, 2565.
- [12] ปรีดา จันทวงษ์, “การศึกษาเปรียบเทียบทดสอบระหว่างหลังคาทั่วไปกับปล่องหลังคาโซลาร์เซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติร่วมกับพัดลมไฟฟ้ากระแสตรงและวิเคราะห์ต้นทุนวงจรชีวิต,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 23, ฉบับที่ 1, หน้า 104-114, มกราคม-เมษายน, 2556.
- [13] สาวิตรี ยูเพียว, “การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนของกระบวนการผลิตน้ำมะนาวบรรจุขวดพลาสติกใส กรณีศึกษา บริษัท บ้านมะนาว จำกัด,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี, 2564.
- [14] ชีร์ เขาวนนทปัญญา, “การกักกรองนในบรรยากาศของเหล็กกล้า: ทบทวนวรรณกรรมและกรณีศึกษา,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 178-186, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2560.
- [15] Society for Maintenance and Reliability Professionals, *SMRP Best Practices Metric for Maintenance and Reliability*, 6th ed. Georgia: SMRP Press, 2020, 49-50.
- [16] Ron Moore, “Maintenance Costs as a Percent of Asset Replacement Value: A Useful Measure?.” [Online]. Available: <https://assetmanagementprofessionals.org/blogs/santiago-tamayo/2024/06/21/maintenance-costs-as-a-percent-of-asset-replacemen>. (Accessed: January 10, 2025).

ตัวแบบสถิติเพื่อพยากรณ์คุณภาพอากาศ: กรณีศึกษาค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในจังหวัดเชียงใหม่

Statistical Model for Air Quality Forecasting: A Case Study of Dust Particles No Larger Than 2.5 Microns (PM2.5) in Chiang Mai Province

กฤติชัย โรจนะ¹ และ รัชนีวรรณ วงศ์พระจันทร์^{2*}

^{1,2}สาขาวิชาสถิติและการจัดการสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Kittichai Rochana¹ and Ratchaneewan Wongprachan^{2*}

^{1,2}Division of Statistics and Information Management, Faculty of Science, Maejo University

ratchaneewan@mju.ac.th

Received 20 April 2025

Revised 30 May 2025

Accepted 11 June 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติสำหรับคาดการณ์ระดับ PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคนิคการพยากรณ์ 3 วิธี ได้แก่ แบบจำลองบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ และแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์เป็นข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนของระดับ PM2.5 ที่จัดเก็บโดยกรมควบคุมมลพิษ ระหว่างปี พ.ศ. 2556 - 2567 รวมทั้งสิ้น 144 เดือน โดยข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดฝึกฝน จำนวน 120 เดือน (พ.ศ. 2556 - 2565) เพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง และชุดทดสอบ จำนวน 24 เดือน (พ.ศ. 2566 - 2567) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองด้วยวิธีของวินเทอร์สามารถทำนายปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ได้แม่นยำกว่าวิธีอื่น โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยต่ำที่สุด แบบจำลองที่ดีที่สุดนี้ถูกนำไปใช้ในการพยากรณ์ค่า PM2.5 รายเดือนสำหรับปี พ.ศ. 2568 ซึ่งพบว่าช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายนมีแนวโน้มที่ระดับ PM2.5 จะสูงเกินเกณฑ์ที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ที่ 37.5 มคก./ลบ.ม. เน้นย้ำถึงความจำเป็นในการบริหารจัดการคุณภาพอากาศเชิงรุกในช่วงเวลาดังกล่าว

คำสำคัญ: บ็อกซ์-เจนกินส์, การปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์, การถดถอยเชิงเส้น

Abstract

This research aims to develop a statistical model for forecasting PM2.5 levels in Chiang Mai Province. Three forecasting techniques were compared: the Box-Jenkins model, Winter's exponential smoothing model, and the linear regression model. The analysis utilized monthly average PM2.5 data from the Pollution Control Department covering 144 observations from 2013 to

2024. The dataset was divided into two subsets: a training set of 120 months (2013–2022) for model development and a testing set of 24 months (2023–2024) for model performance evaluation. Results showed that Winter’s exponential smoothing model yielded the most accurate predictions, with the smallest mean absolute percentage error (MAPE) among the three methods. The best-performing model was then used to forecast monthly PM2.5 levels for the year 2025. The forecast suggested that PM2.5 levels from February to April are likely to exceed the standard threshold of 37.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ set by the Pollution Control Department, underscoring the importance of proactive air quality management during this period.

Keywords: Box-Jenkins Model, Winter’s Exponential Smoothing Model, Linear Regression Model

1. บทนำ

ปัญหาหมอกควันและคุณภาพอากาศในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ยังคงมีค่าฝุ่นละอองในอากาศเกินมาตรฐานที่กำหนด และมีแนวโน้มทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากภูมิประเทศที่ถูกล้อมรอบด้วยภูเขา ซึ่งจำกัดการไหลเวียนของอากาศ เกิดฝุ่นละอองสะสมในชั้นบรรยากาศ ทำให้อากาศไม่หมุนเวียน หรือที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ฝาชีครอบต่ำ จึงพบหมอกควันหนาแน่นเกินจากค่ามาตรฐานที่กำหนด ฝุ่นละออง PM2.5 เป็นฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและเข้าสู่กระแสเลือดได้ ส่งผลต่อสุขภาพในระยะยาว ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น โรคมะเร็งปอด โรคหลอดเลือดสมอง โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหอบหืด และโรคภูมิแพ้ เป็นต้น รวมถึงภาวะผิดปกติทางผิวหนังและดวงตา ทั้งนี้ข้อมูลจากกระทรวงสาธารณสุขในปี พ.ศ. 2566 พบว่ามลพิษทางอากาศส่งผลให้ประชาชนเจ็บป่วยจากโรคที่เกี่ยวข้องกว่า 10.5 ล้านราย [1, 2]

นอกจากลักษณะภูมิประเทศที่เอื้อต่อการสะสมของฝุ่นละอองแล้ว ต้นเหตุสำคัญของการเกิดฝุ่นละออง PM2.5 ในภาคเหนือมีความเชื่อมโยงกับการเผาไหม้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาในที่โล่ง การเผาเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก หรือทำการเกษตร การเผาเพื่อหาของป่า ทำไร่เลื่อนลอย หรือเตรียมพื้นที่เลี้ยงสัตว์ การเผาในประเทศเพื่อนบ้าน การเผาไหม้ขยะที่ไม่เหมาะสมหรือไม่ได้ควบคุมอย่างเหมาะสม ปัจจัยเพิ่มเติมยังรวมถึงการใช้พลังงานจากการเผาไหม้ที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้เชื้อเพลิงที่ไม่ได้มาตรฐาน กระบวนการเผาที่ไม่สะอาดในการผลิตไฟฟ้า หรือการใช้พลังงานอื่น ๆ ตลอดจนกิจกรรมด้านการขนส่ง การจราจรทางถนน และการขนส่งทางอากาศ เป็นต้น [3] ผลกระทบจากมลภาวะทางอากาศไม่ได้จำกัดเพียงด้านสุขภาพเท่านั้น แต่ยังส่งผลในวงกว้างต่อระบบเศรษฐกิจของจังหวัดเชียงใหม่และพื้นที่ใกล้เคียงโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว ที่เผชิญกับภาวะซบเซาจากการหดตัวของนักท่องเที่ยว อันเป็นผลสืบเนื่องจากความกังวลเกี่ยวกับปัญหาคุณภาพอากาศ ส่งผลต่อรายได้ที่ลดลงของร้านอาหาร โรงแรม และสถานที่ท่องเที่ยวต่าง ๆ นอกจากนี้การแพร่กระจายของฝุ่นละอองในอากาศยังทำให้ทัศนวิสัยแย่งนำไปสู่ความไม่สะดวกในการคมนาคมทั้งภาคพื้นดินและทางอากาศ

ปัญหา PM2.5 ยังคงอยู่ในระดับที่น่าเป็นห่วงโดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ จากรายงานค่าดัชนีคุณภาพอากาศ เมื่อวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2567 พบว่ามีระดับ PM2.5 อยู่ในช่วงระหว่าง 74.0 – 181.3 มคก./ลบ.ม. ซึ่งส่งผลให้จังหวัดเชียงใหม่ถูกจัดให้อยู่ในอันดับหนึ่งของเมืองที่มีมลพิษทางอากาศรุนแรงที่สุดในโลกในวันดังกล่าว [4] ปัญหามลพิษจากฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ยังคงเป็นประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อ

โดยตรงต่อสุขภาพของประชาชน เพื่อยกระดับการควบคุมคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษจึงได้ปรับปรุงเกณฑ์มาตรฐานใหม่และประกาศบังคับใช้ในวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2566 โดยลดระดับความเข้มข้นเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมงของ PM2.5 จากเดิมไม่เกิน 50 ลงมาเป็น 37.5 มคก./ลบ.ม. [5]

การจัดการปัญหามลพิษทางอากาศจำเป็นต้องดำเนินการอย่างทันทั่วทั้ง โดยต้องอาศัยการบูรณาการความร่วมมือจากทุกภาคส่วน เพื่อควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษและคุ้มครองสุขภาพของประชาชน ดังนั้นการเฝ้าระวังและประเมินระดับ PM2.5 ควบคู่ไปกับการวางมาตรการเพื่อลดการสะสมของมลภาวะในชั้นบรรยากาศ จึงถือเป็นประเด็นความสำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงได้ตระหนักถึงความสำคัญและผลที่เกิดจากปัญหานี้ จึงดำเนินการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางสถิติเพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่น PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ด้วยวิธีการที่หลากหลาย โดย วัฒนา ชยธวัช [6] ได้ใช้วิธีแยกส่วนประกอบแบบดั้งเดิมกับข้อมูลรายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2563 – 2565 รวมระยะเวลา 36 เดือน ผลการพยากรณ์ให้ค่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เท่ากับ 28.72 ซึ่งแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถแสดงองค์ประกอบของแนวโน้มและฤดูกาลได้อย่างคร่าว ๆ แต่ข้อจำกัดด้านความแม่นยำของแบบจำลองสะท้อนให้เห็นว่าวิธีดังกล่าวอาจไม่สามารถจับรูปแบบที่ซับซ้อนของข้อมูลมลพิษทางอากาศได้อย่างเพียงพอ ขณะเดียวกัน ปรัชญา สิงหวรรณ [7] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองหน่วยความจำระยะยาว (LSTM) สำหรับพยากรณ์ค่า PM2.5 รายชั่วโมงล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2561 - 2562 พบว่าแบบจำลอง LSTM ให้ค่า MAPE ที่สถานีศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ เท่ากับ 20.42 อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้แบบจำลองเดียวกันกับข้อมูลจากสถานีโรงเรียนยุพราชวิทยาลัย กลับให้ค่า MAPE สูงถึง 46.40 ซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรของแบบจำลองเมื่อนำไปใช้กับข้อมูลจากพื้นที่ต่างกัน อันอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณภาพข้อมูล ขอบเขตเวลา และการจัดการกับข้อมูลที่ขาดหาย

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่พบในงานวิจัยข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองที่แตกต่างกับที่เคยมีการศึกษา โดยใช้ตัวแบบสถิติ 3 เทคนิค ได้แก่ แบบจำลองบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์ และแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น โดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนย้อนหลังเป็นระยะเวลา 10 ปี ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ข้อมูลต่อเนื่องมากขึ้น ช่วยให้สามารถตรวจสอบและจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าฝุ่น PM2.5 ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิค เพื่อเลือกตัวแบบจำลองที่ดีที่สุดมาทำนายค่าเฉลี่ยรายเดือนของฝุ่น PM2.5 ล่วงหน้า 12 เดือน ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถคาดการณ์ระดับ PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ล่วงหน้าได้ ซึ่งจะช่วยในการเฝ้าระวังและประเมินสถานการณ์มลพิษทางอากาศได้ดียิ่งขึ้น การติดตามแนวโน้มฝุ่น PM2.5 ล่วงหน้า ช่วยเสริมสร้างความพร้อมในการจัดการและป้องกันปัญหามลพิษทางอากาศอย่างมีระบบ

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองมลพิษทางอากาศเพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 โดยใช้ตัวแบบทางสถิติ 3 เทคนิค ได้แก่ แบบจำลองบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์ และแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

2.2 ขอบเขตด้านพื้นที่ ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ในเขตจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้ข้อมูลค่า PM2.5 เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ที่จัดเก็บบันทึกรายเดือนในฐานะข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ณ จุดตรวจวัด ในเขต ต.ศรีภูมิ อ.เมือง จ.เชียงใหม่

2.3 ขอบเขตด้านเวลา ทำการพัฒนาตัวแบบโดยใช้ข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 ในช่วง ปี พ.ศ. 2556 ถึง 2567

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 องค์ประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลา [6, 8]

แนวโน้ม (Trend) เป็นการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งมักจะแสดงทิศทางที่ชัดเจนในระยะยาว โดยแนวโน้มสามารถมีในทิศทางเพิ่มขึ้น ลดลง หรือเปลี่ยนแปลงไปมา โดยไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรงเสมอไป

ฤดูกาล (Seasonal) เป็นการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่เกิดขึ้นเป็นระยะๆ ในช่วงเวลาที่กำหนดและสามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ เช่น การเคลื่อนไหวในช่วงรายเดือน ไตรมาส หรือปี มักเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น สภาพอากาศ หรือนโยบาย

วัฏจักร (Cyclic) เป็นรูปแบบการขึ้นลงของข้อมูลที่ไม่มีช่วงเวลาที่แน่นอน มักเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางเศรษฐกิจหรือวัฏจักรทางธุรกิจ เช่น ภาวะเศรษฐกิจขาขึ้นหรือขาลง โดยทั่วไปแล้ว วัฏจักรจะมีระยะเวลายาวนานกว่ารูปแบบตามฤดูกาล และขนาดของวัฏจักรมักมีความผันแปรมากกว่าขนาดของรูปแบบตามฤดูกาล ระยะเวลาของวัฏจักรมักยาวนานกว่า 2 ปี และไม่สามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำเหมือนกับรูปแบบฤดูกาล

ความผิดปกติ (Irregular Fluctuation) เป็นองค์ประกอบสุ่มที่ผันผวนจากเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ก่อนที่เหตุการณ์จะเกิดขึ้น เช่น ภัยจากธรรมชาติ โรคระบาด เป็นต้น

3.2 เทคนิคการพยากรณ์

3.2.1 แบบจำลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Model) เป็นเทคนิคการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่ต้องอาศัยข้อมูลที่มีลักษณะคงที่ (Stationary) โดยสามารถตรวจสอบลักษณะของข้อมูลได้จากกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation Function; ACF) และกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองบางส่วน (Partial Autocorrelation Function; PACF) หากพบว่าข้อมูลมีลักษณะไม่คงที่ จำเป็นที่จะต้องทำให้คงที่โดยการแปลงข้อมูล โดยการหาผลต่างของอนุกรมเวลาในกรณีที่พบว่ามีแนวโน้ม การหาผลต่างฤดูกาลของอนุกรมเวลาในกรณีที่พบว่ามีฤดูกาล เมื่อดำเนินการแปลงข้อมูลอนุกรมเวลาให้คงที่เรียบร้อยแล้ว จะพิจารณากราฟ ACF และ PACF อีกครั้ง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองที่สอดคล้องและเหมาะสมที่สุดต่อไป

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาองค์ประกอบของฤดูกาลร่วมด้วย เนื่องจากข้อมูลค่าฝุ่น PM_{2.5} มีลักษณะความผันแปรตามฤดูกาล จึงเลือกใช้แบบจำลอง SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ค่าคงที่ (α) รวมถึง ตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองทั้งแบบไม่มีฤดูกาลและแบบมีฤดูกาล ซึ่งมีอันดับเท่ากับ p และ P ตามลำดับ ตลอดจนตัวดำเนินการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบไม่มีฤดูกาลและแบบมีฤดูกาล ซึ่งมีอันดับเท่ากับ q และ Q ตามลำดับ ตัวแบบ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้ [9, 10]

$$\nu_p(B)N_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^DY_t = \alpha + \kappa_q(B)K_Q(B^s)\xi_t \quad (1)$$

เมื่อ	Y_t	คือ ข้อมูลอนุกรม ณ เวลา t
	ξ_t	คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลา t ภายใต้ข้อสมมติ $\xi_t \sim Nid(0, \sigma^2)$
	B	คือ ตัวดำเนินการย้อนกลับ โดยที่ $B^k Y_t = Y_{t-k}$
	d, D	คือ อันดับผลต่างและผลต่างฤดูกาลของอนุกรมเวลา
	s	คือ จำนวนฤดูกาลต่อปี

$$\begin{aligned}\alpha &= \mu \nu_p(B) N_p(B^s) \quad \text{เมื่อ } \mu \text{ เป็นเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่มีลักษณะคงที่} \\ \nu_p(B) &= 1 - \nu_1 B - \nu_2 B^2 - \dots - \nu_p B^p \\ N_p(B^s) &= 1 - N_1 B^s - N_2 B^{2s} - \dots - N_p B^{Ps} \\ \kappa_q(B) &= 1 - \kappa_1 B - \kappa_2 B^2 - \dots - \kappa_q B^q \\ K_Q(B^s) &= 1 - K_1 B^s - K_2 B^{2s} - \dots - K_Q B^{Qs}\end{aligned}$$

3.2.2 แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์ (Winters' Exponential Smoothing) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีประกอบด้วยแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงร่วมกับความผันแปรตามฤดูกาล โดยสามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบบวกและรูปแบบคูณ ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการพยากรณ์ด้วยรูปแบบคูณ เนื่องจากข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 มีลักษณะของความผันแปรตามฤดูกาลที่ไม่แน่นอน และเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา พยากรณ์ที่ใช้จึงต้องให้น้ำหนักกับข้อมูลในอดีตอย่างไม่เท่ากัน โดยอาศัยค่าปรับให้เรียบ (Smoothing Constants) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่าคงที่สำหรับระดับ α สำหรับความชัน γ และสำหรับฤดูกาล δ ($0 \leq \alpha, \gamma, \delta \leq 1$) ตัวแบบจำลองด้วยเทคนิคการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์แบบคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (2) [11, 12]

$$Y_t = (\beta_0 + \beta_1 t) M_t \xi_t \quad (2)$$

เมื่อ Y_t คือ ข้อมูลอนุกรม ณ เวลา t
 β_0, β_1 คือ ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกระดับของอนุกรมเวลา และความชันของแนวโน้ม
 M_t คือ ความผันแปรตามฤดูกาล ณ เวลา t เมื่อ s คือ จำนวนฤดูกาลต่อปี
 ξ_t คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลา t ภายใต้ข้อสมมติ $Y_t = \theta \exp(\hat{y}_t)$
 และมีตัวแบบการพยากรณ์ สำหรับช่วงเวลาในอนาคต r คาบ ณ เวลา t แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\hat{Y}_{t+r} = (v_t + u_t r) \hat{M}_t \quad (3)$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t+r}$ คือ ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + r$ ซึ่ง r หมายถึงจำนวนคาบเวลาที่พยากรณ์ล่วงหน้า

$$\begin{aligned}v_t &= \alpha \left(\frac{Y_t}{\hat{M}_{t-s}} \right) + (1 - \alpha)(v_{t-1} + u_{t-1}) \\ u_t &= \gamma (v_t - v_{t-1}) + (1 - \gamma) u_{t-1} \\ \hat{M}_t &= \delta \left(\frac{Y_t}{v_t} \right) + (1 - \delta) \hat{M}_{t-s}\end{aligned}$$

3.2.3 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) เทคนิคทางสถิติที่ใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Independent Variables) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์หรือคาดการณ์ค่าของตัวแปรตาม จากค่าของตัวแปรต้นที่กำหนด ในการสร้างแบบจำลองคาดการณ์ระดับฝุ่นละออง PM2.5 ภายใต้ชุดข้อมูลอนุกรมเวลาขนาด n ซึ่งแสดงลักษณะของแนวโน้มและฤดูกาล ดังนั้นตัวแบบการถดถอยจะประกอบไปด้วยส่วนของแนวโน้มเชิงเส้นซึ่งพิจารณาจากตัวแปรเวลา และส่วนของฤดูกาล

ซึ่งตัวแปรฤดูกาลจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรหุ่นจำนวน $s-1$ ตัว เมื่อ s คือจำนวนฤดูกาลต่อปี โดยจะกำหนดให้ตัวแปรหุ่นมีค่าเท่ากับ 0 เมื่ออนุกรมเวลาไม่ได้เกิดในฤดูกาลที่กำหนด และมีค่าเท่ากับ 1 เมื่ออนุกรมเวลาเกิดในฤดูกาลที่กำหนด จะได้ตัวแบบจำลองดังสมการที่ (4) [8]

$$Y_t = \alpha + \beta t + \sum_{i=1}^{s-1} \delta_i M_{it} + \xi_t \quad (4)$$

เมื่อ Y_t คือ ข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา t
 α คือ ระยะตัดแกนตั้ง
 β คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยของแนวโน้ม
 δ_i คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยของฤดูกาลที่ i ; $i = 1, 2, \dots, s-1$
 $M_{it} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา } t \text{ เกิดในฤดูกาลที่ } i \\ 0 & \text{เมื่อข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา } t \text{ ไม่ได้เกิดในฤดูกาลที่ } i \end{cases}$
 ξ_t คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลา t ภายใต้ข้อสมมติ $\xi_t \sim Nid(0, \sigma^2)$
 ตัวแบบการพยากรณ์ ณ เวลา t แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$\hat{Y}_t = a + bt + \sum_{i=1}^{s-1} c_i M_{it} \quad (5)$$

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ข้อมูลอนุกรมเวลาชุดที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล PM2.5 จำนวน 24 เดือน ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2566 – 2567 จะถูกนำมาประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เป็นเกณฑ์ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง โดยสามารถแปลผลระดับความแม่นยำได้ดังตารางที่ 1 [13]

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{e_t}{Y_t} \times 100 \right|}{n} \quad (6)$$

โดยที่ Y_t คือ ข้อมูลอนุกรม ณ เวลา t
 e_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t ; $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$
 n คือ จำนวนข้อมูลอนุกรมเวลา

ภายหลังการประเมินความแม่นยำของแต่ละวิธี ตัวแบบจำลองต่าง ๆ จะถูกตรวจสอบข้อสมมติที่สำคัญโดยใช้การทดสอบทางสถิติต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบของ Ljung-Box Q เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวที่ไม่เป็นอิสระกันของความคลาดเคลื่อน การทดสอบ t สำหรับความมีนัยสำคัญของพารามิเตอร์ การทดสอบ Kolmogorov-Smirnov เพื่อตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อน และการทดสอบ Levene เพื่อประเมินความแปรปรวนคงที่

ตารางที่ 1 เกณฑ์ความแม่นยำในการพยากรณ์ด้วยวิธี MAPE [14]

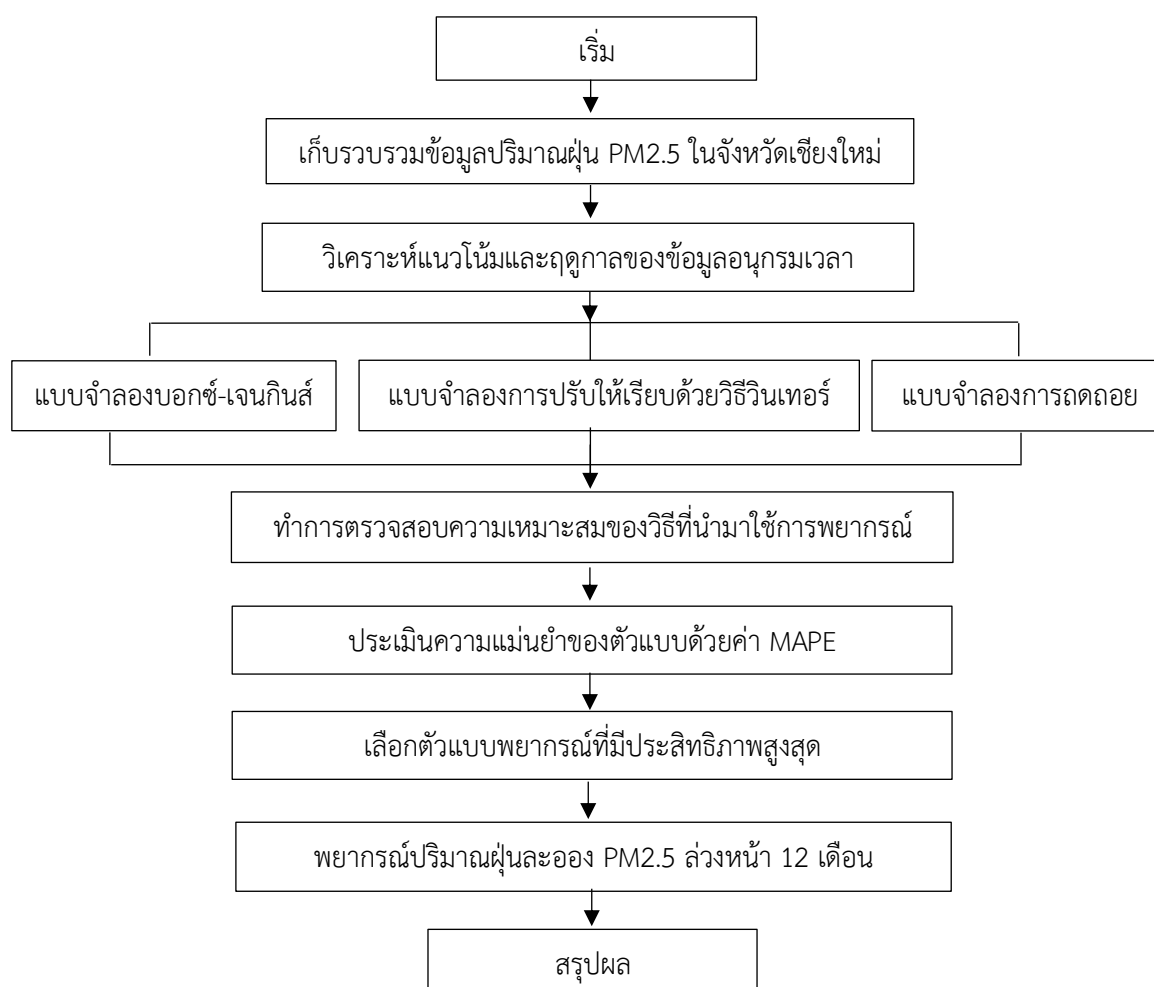
MAPE	ระดับความแม่นยำ
< 10%	แม่นยำสูง
10% – 20%	แม่นยำดี
20% - 50%	แม่นยำใช้ได้
มากกว่า 50%	ไม่มีความแม่นยำ

3.4 การพยากรณ์ PM2.5

นำแบบจำลองที่มีเหมาะสมและมีความแม่นยำสูงสุดไปใช้ในการคาดการณ์ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าฝุ่นละออง PM2.5 ล่วงหน้า 12 เดือน สำหรับปี พ.ศ. 2568

4. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าพัฒนาแบบจำลองการทำนายปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ในเขตจังหวัดเชียงใหม่ มีวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

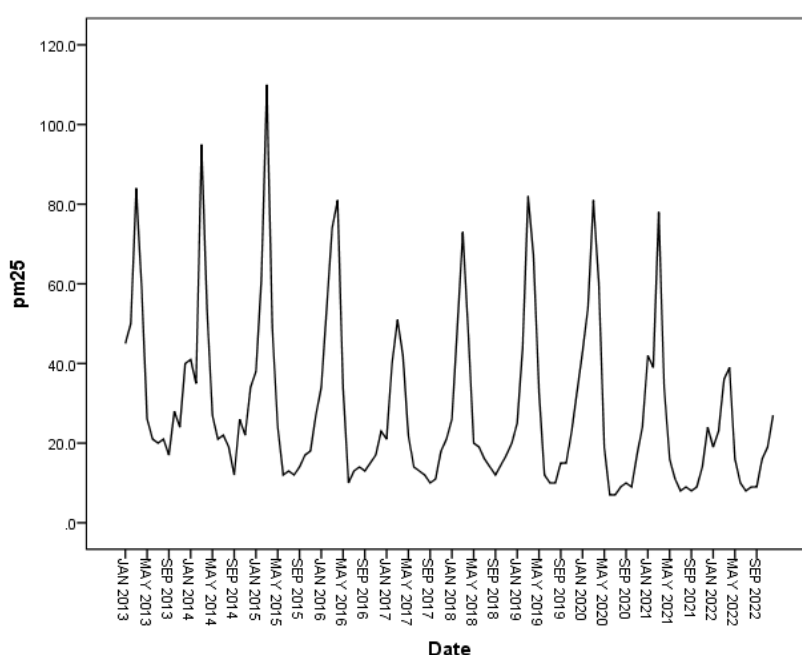
ประชากร คือ ข้อมูลค่าฝุ่นละออง PM2.5 เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ในจังหวัดเชียงใหม่

กลุ่มตัวอย่าง คือ ข้อมูลค่าฝุ่นละออง PM2.5 เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ณ จุดตรวจวัดในเขต ต.ศรีภูมิ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ ที่จัดเก็บบันทึกรายเดือนในฐานะข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ตั้งแต่ พ.ศ. 2556 ถึง 2567 รวมทั้งสิ้นจำนวน 144 เดือน ข้อมูลที่ศึกษาจะถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดฝึกฝน (Training Data Set) จำนวน 120 เดือน โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2556 - 2565 เพื่อใช้ในการเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์และแนวโน้มของข้อมูล โดยข้อมูลชุดนี้จะถูกนำมาสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ แบบจำลองบ็อกซ์-เจนกินส์ แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์ และแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น พร้อมตรวจสอบความเหมาะสมและคุณสมบัติตามข้อสมมติของตัวแบบ ข้อมูลชุดที่ 2 จะถูกนำมาใช้เป็นชุดทดสอบ (Test Data Set) จำนวน 24 เดือน โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ พ.ศ. 2566 - 2567

ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะดำเนินการโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ Minitab และ SPSS หลังจากได้แบบจำลองทั้งสามแล้ว จะประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่า MAPE ในการประเมินความแม่นยำของแต่ละวิธี ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่มีหน่วยต่างกัน และไม่ถูกกระทบจากขนาดของข้อมูล เมื่อได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดแล้ว จะนำไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ปริมาณฝุ่น PM2.5 ล่วงหน้า 12 เดือน ของปีพ.ศ. 2568 ต่อไป

5. ผลการวิจัย

ข้อมูลระดับฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งแต่ พ.ศ. 2556 - 2565 มีลักษณะการเคลื่อนไหวที่ไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2 จากผลวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย 28.80 มก./ลบ.ม. มีค่าต่ำสุด 7 มก./ลบ.ม. และค่าสูงสุดเท่ากับ 110 มก./ลบ.ม. จากผลการทดสอบสถิติ Kolmogorov-Smirnov เพื่อตรวจสอบการแจกแจง พบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามรูปแบบการแจกแจงปกติ (KS-Statistic = 0.192, P-Value < 0.01) จึงได้ดำเนินการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ $\ln(Y)$ เพื่อปรับลักษณะการกระจายของข้อมูลให้สอดคล้องกับสมมติฐานการแจกแจงปกติ (KS-Statistic = 0.071, P-Value < 0.139)



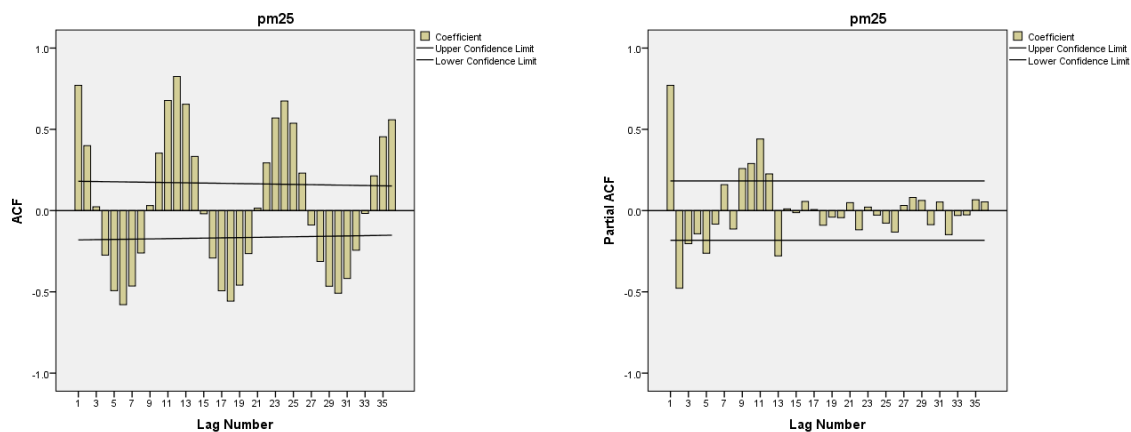
รูปที่ 2 การเคลื่อนไหวของฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2556 – 2565

ตารางที่ 2 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่

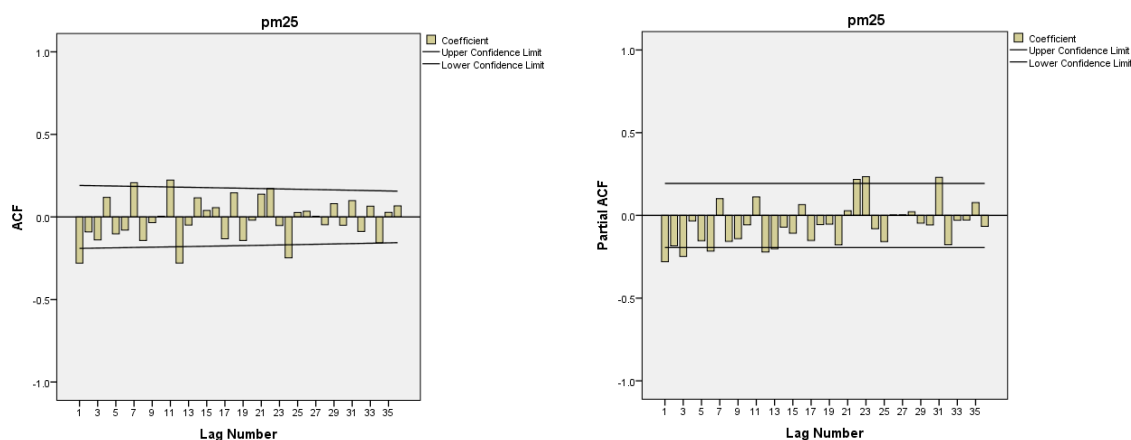
ข้อมูล	Min	Max	Mean	Standard Deviation	KS-Statistic	P-value
PM2.5	7	110	28.796	21.303	0.192	< 0.01
ln(PM2.5)	1.946	4.700	3.130	0.669	0.071	0.139

5.1 แบบจำลองบอซ-เจนกินส์

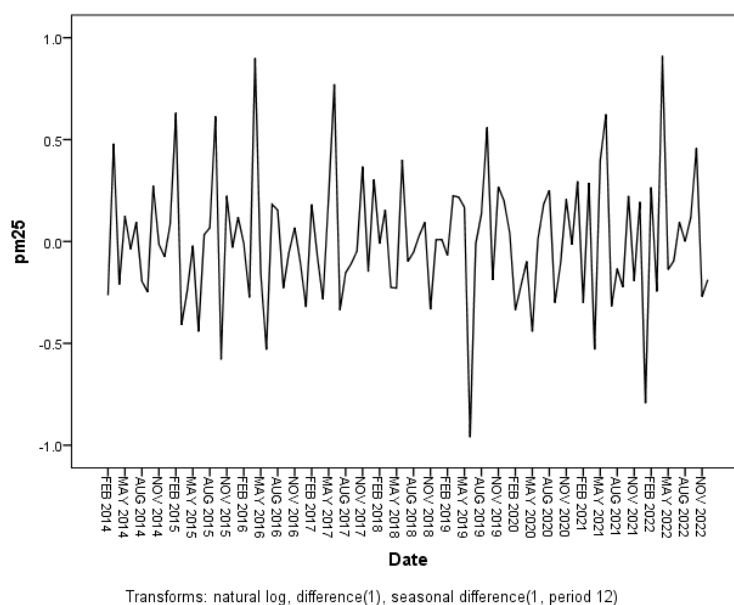
ข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2556 ถึง 2565 หลังจากถูกแปลงเป็น $\ln(Y)$ แล้วพบว่าอนุกรมเวลายังมีลักษณะไม่คงที่ โดยสะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มที่ต่อเนื่องและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างเด่นชัด จากกราฟ ACF และ PACF ในรูปที่ 3 ชี้ให้เห็นว่าถึงลักษณะไม่คงที่ของข้อมูลอนุกรมเวลา จึงทำการแปลงข้อมูลเพิ่มเติมด้วยการหาผลต่างอันดับที่ 1 ($d=1$) และผลต่างฤดูกาลอันดับที่ 1 ($D=1$) เพื่อขจัดแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล ซึ่งผลลัพธ์จากการแปลง (รูปที่ 4 และ 5) แสดงให้เห็นว่าอนุกรมเวลามีลักษณะคงที่มากยิ่งขึ้นและเหมาะสมต่อการนำไปสร้างแบบจำลองเชิงอนุกรมเวลา หลังจากกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมและคัดเลือกแบบจำลองที่ดี 3 ตัวแบบ โดยใช้เกณฑ์ AIC เป็นการคัดเลือกจึงได้ตัวแบบดังนี้ SARIMA (1,1,0)(0,1,1)₁₂, SARIMA (0,1,1)(2,1,0)₁₂ และ SARIMA (0,1,1)(3,1,0)₁₂ ตามลำดับ ดังผลวิเคราะห์ในตารางที่ 3



รูปที่ 3 กราฟ ACF และ PACF ของฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$



รูปที่ 4 กราฟ ACF และ PACF ของฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$ และทำการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาลอันดับที่ 1



รูปที่ 5 การเคลื่อนไหวของฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ รายเดือนตั้งแต่พ.ศ. 2556 – 2565
เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$ และทำการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาลอันดับที่ 1

ตารางที่ 3 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองบอกซ์-เจนกินส์ เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$

Model	Type	Parameter Estimation			
		Estimate	SE	t-test	P-Value
SARIMA	AR (1)	-0.3426	0.0921	-3.720	<0.001
$(1,1,0)(0,1,1)_{12}$	SMA (12)	0.8539	0.0741	11.521	<0.001
Ljung-Box Q (at Lag 18th) = 24.54 (P-Value = 0.078), KS-Statistic = 0.073 (P-Value = 0.618)					
Levene-Statistic = 1.658 (P-Value = 0.095, t-test = 0.21 ($H_0: \mu_e=0$, P-Value = 0.836))					
SARIMA	SAR (12)	-0.5092	0.0864	-5.894	<0.001
$(0,1,1)(2,1,0)_{12}$	SAR (24)	-0.7132	0.0905	-7.885	<0.001
	MA (1)	0.5197	0.0850	6.114	<0.001
Ljung-Box Q (at Lag 18th) = 20.51 (P-Value = 0.153), KS-Statistic = 0.069 (P-Value = 0.681)					
Levene-Statistic = 1.745 (P-Value = 0.075), t-test = 0.043 ($H_0: \mu_e=0$, P-Value = 0.966)					
SARIMA	SAR (12)	-0.6095	0.1028	-5.926	<0.001
$(0,1,1)(3,1,0)_{12}$	SAR (24)	-0.7862	0.0977	-8.046	<0.001
	SAR (36)	-0.2895	0.1124	-2.576	0.011
	MA (1)	0.4782	0.0887	5.390	<0.001
Ljung-Box Q (at Lag 18th) = 20.13 (P-Value = 0.126), KS-Statistic = 0.055 (P-Value = 0.980)					
Levene-Statistic = 1.199 (P-value = 0.298), t-test = 0.215 ($H_0: \mu_e=0$, P-Value = 0.830)					

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง SARIMA ในตารางที่ 3 ได้ตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด 3 ตัวแบบ ได้แก่ SARIMA (1,1,0)(0,1,1)₁₂ SARIMA (0,1,1)(2,1,0)₁₂ และ SARIMA (0,1,1)(3,1,0)₁₂ ผลวิเคราะห์การประมาณค่าพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 ตัวแบบ ให้ค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.01) เพื่อประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง จึงได้ดำเนินการตรวจสอบข้อสมมติของค่าความคลาดเคลื่อนในหลายด้านที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่า ผลการทดสอบ Ljung-Box ที่ lag 18 ของทั้งสามตัว แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนไม่มีอัตสัมพันธ์เหลืออยู่ มีความเป็นอิสระกัน (P-Value > 0.01) นอกจากนี้ผลวิเคราะห์ KS-Test บ่งชี้ว่า มีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ (P-Value > 0.01) อีกทั้งยังผ่านการทดสอบความแปรปรวนคงที่ด้วย Levene's Test (P-Value > 0.01) และค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ (P-Value > 0.01) ดังนั้นแบบจำลองบอกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมทั้งในด้านความสามารถในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูล และการคงสมมติฐานของแบบจำลองอนุกรมเวลา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคต

5.2 แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์

จากผลวิเคราะห์ในตารางที่ 4 พบว่า แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีของวินเทอร์ ภายหลังการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูป $\ln(Y)$ ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ค่าคงที่ปรับให้เรียบสำหรับระดับ (α) เท่ากับ 0.4289 (P-Value < 0.01) ค่าคงที่ปรับให้เรียบสำหรับฤดูกาล (δ) เท่ากับ 0.3377 (P-Value < 0.01) แสดงว่าทั้งองค์ประกอบแนวโน้มและฤดูกาลมีบทบาทในการอธิบายความเคลื่อนไหวของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 และได้ค่าคงที่ปรับให้เรียบสำหรับความชัน (γ) เท่ากับ 0.0005 (P-Value > 0.01) แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเพิ่มหรือลดในข้อมูล แม้ว่าพารามิเตอร์บางตัวจะไม่มีนัยสำคัญในระดับที่กำหนด แต่ภาพรวมของแบบจำลองยังคงแสดงถึงความเหมาะสมในระดับหนึ่ง ทั้งนี้จากการตรวจสอบสมมติฐานของแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่า การทดสอบ Ljung-Box ที่ Lag 18 ให้ค่า Q = 26.738 (P-Value = 0.031) กล่าวคือแบบจำลองไม่มีปัญหาในเรื่องความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน และพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติ โดยให้ค่า KS = 0.063 (P-Value = 0.728) ขณะที่ผลการทดสอบความแปรปรวนคงที่ด้วย Levene's Test (P-Value = 0.080) และค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ (t = 0.215, P-Value = 0.830)

ตารางที่ 4 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$

Model	Parameter	Parameter Estimation			
		Estimate	SE	t-test	P-Value
Winter	α	0.4289	0.0671	6.391	<0.001
	γ	0.0005	0.0170	0.032	0.979
	δ	0.3377	0.0883	3.824	<0.001
Ljung-Box Q (at Lag 18 th) = 26.738 (P-Value = 0.031), KS-Statistic = 0.063 (P-Value = 0.728)					
Levene-Statistic = 1.713 (P-Value = 0.080), t-test = 0.215 (H ₀ : $\mu_e=0$, P-Value = 0.830)					

5.3 แบบจำลองด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นภายหลังการแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$ ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระสามารถสามารถอธิบายและทำนายค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้อย่างมีนัยสำคัญ ($F = 71.077$, $p\text{-value} < 0.001$) และแบบจำลองสามารถอธิบายความผันแปรของค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้ถึง 87.6% ($R^2 = 0.876$) ได้แบบจำลองดังนี้

$$\ln(Y_t) = 3.6252 - 0.0052t + 0.1244M_{1t} + 0.4367M_{2t} + 0.9652M_{3t} + 0.6201M_{4t} - 0.1866M_{5t} \\ - 0.7555M_{6t} - 0.8133M_{7t} - 0.7911M_{8t} - 0.8394M_{9t} - 0.5860M_{10t} - 0.3619M_{11t}$$

เมื่อกำหนดให้ t คือ คาบเวลาที่ 1, 2, 3, ... ($t=1$ คือ เดือนมกราคม พ.ศ. 2556) และ

$$M_{it} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา } t \text{ เกิดในเดือนที่ } i; i = 1, 2, \dots, 11 \\ 0 & \text{เมื่อข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา } t \text{ ไม่ได้เกิดในเดือนที่ } i; i = 1, 2, \dots, 11 \end{cases}$$

ตารางที่ 5 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$

Model	Estimate	SE	t-test	P-Value	VIF
Constant	3.6252	0.0851	42.609	<0.001	-
t	-0.0052	0.0006	-8.301	<0.001	1.010
M_{1t}	0.1244	0.1055	1.179	0.241	1.841
M_{2t}	0.4367	0.1055	4.140	<0.001	1.840
M_{3t}	0.9652	0.1055	9.152	<0.001	1.839
M_{4t}	0.6201	0.1054	5.882	<0.001	1.837
M_{5t}	-0.1866	0.1054	-1.771	0.079	1.836
M_{6t}	-0.7555	0.1054	-7.169	<0.001	1.836
M_{7t}	-0.8133	0.1054	-7.719	<0.001	1.835
M_{8t}	-0.7911	0.1053	-7.510	<0.001	1.834
M_{9t}	-0.8394	0.1053	-7.969	<0.001	1.834
M_{10t}	-0.5860	0.1053	-5.564	<0.001	1.834
M_{11t}	-0.3619	0.1053	-3.436	<0.001	1.833

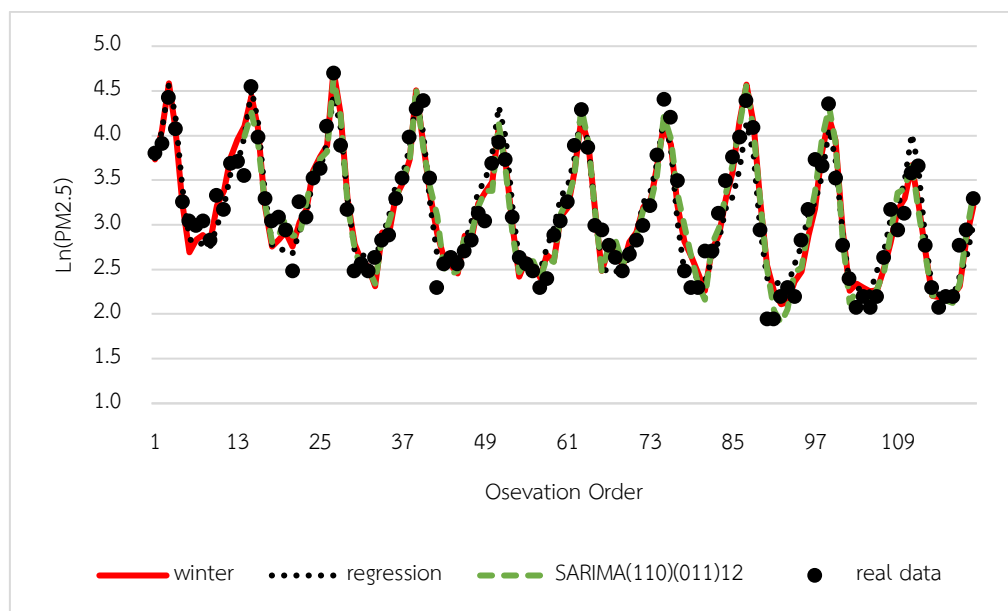
$R = 0.889$, $R^2 = 0.876$, $F = 71.077$ (P-Value <0.001), KS-Statistic = 0.074 (P-Value = 0.109)

Levene-Statistic = 0.717 (P-Value = 0.720), Durbin -Watson = 1.100 (P-Value <0.001)

t-test = -3.177e-16 ($H_0: \mu_e=0$, P-Value = 0.999)

จากผลวิเคราะห์พบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของ $t=-0.0052$ (P-Value <0.001) แสดงถึงแนวโน้มลดลงของระดับฝุ่นละออง PM2.5 เมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่ตัวแปรฤดูกาลในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-เมษายน มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวกแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของฤดูกาลที่มีต่อระดับฝุ่นละออง PM2.5 อย่างมีนัยสำคัญ โดยส่งผลให้ค่าฝุ่นละอองสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับช่วงเดือนอื่นของปี เพื่อประเมินความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นได้ตรวจสอบสมมติฐานสำคัญ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงใกล้เคียงปกติ (KS=0.074, p-value =

0.109), มีความแปรปรวนคงที่ (Levene=0.717, P-Value = 0.720) มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ ($t=-3.177e-16$, P-Value = 0.999) อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีความสัมพันธ์กันเชิงบวก (Durbin Watson = 1.100, P-Value <0.001) แบบจำลองนี้จึงยังไม่เหมาะสมตามหลักของการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 6 ค่าพยากรณ์ฝุ่นละออง PM2.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2556 - 2567

รูปที่ 6 แสดงผลการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2556 ถึง 2565 โดยใช้ข้อมูลจากชุดฝึกฝน (Train Data Set) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางสถิติ จากผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองทั้งสามแบบที่นำมาเปรียบเทียบให้ผลการพยากรณ์ที่ใกล้เคียงกัน แต่แต่ละเทคนิคมีความสามารถในการจับแนวโน้มและรูปแบบของข้อมูลได้ในระดับที่สอดคล้องกัน เพื่อให้สามารถระบุแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ จึงได้ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบของแต่ละแบบจำลองในขั้นตอนถัดไป

5.4 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 บนสเกลของลอการิทึมธรรมชาติแล้ว การแปลงค่าพยากรณ์กลับสู่สเกลดั้งเดิมเพื่อให้สามารถตีความได้ในบริบทของความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ จำเป็นต้องคำนึงถึงความเอนเอียงที่เกิดจากการแปลงกลับด้วยวิธี Smearing Estimate [15] โดยมีหลักการคำนวณดังนี้: ให้ y_t แทนค่าพยากรณ์ของ $\ln(Y_t)$ และให้ θ แทนค่า Smearing Factor

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \exp(e_t) \quad \text{โดยที่ } e_t = \ln(Y_t) - y_t$$

ดังนั้นค่าพยากรณ์เมื่อแปลงกลับมาจะประมาณได้จาก

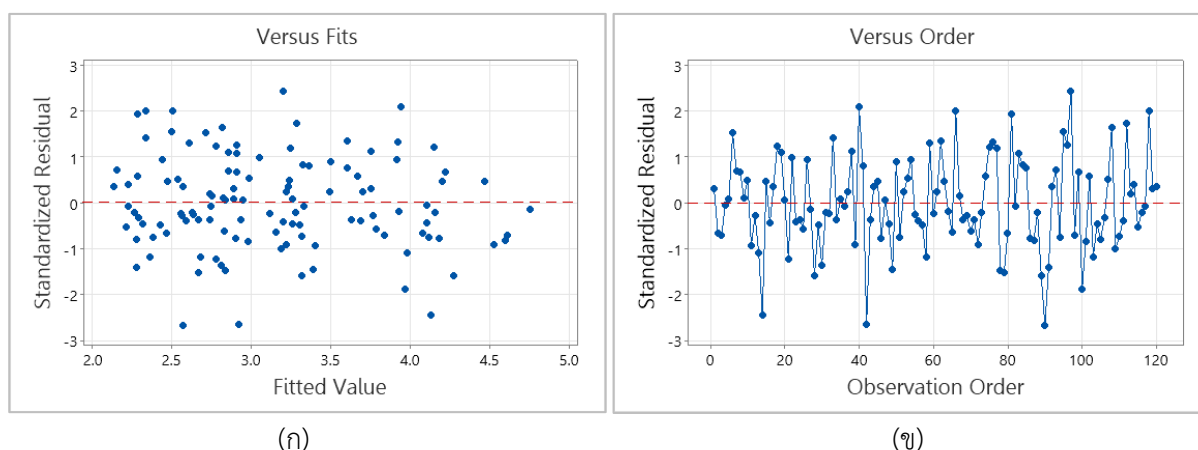
$$Y_t = \theta \exp(\hat{y}_t)$$

กระบวนการดังกล่าวช่วยให้ค่าพยากรณ์ที่แปลงกลับมีความแม่นยำและลดความเอนเอียง และไม่จำเป็นต้องสมมติให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้ดำเนินการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2566 ถึง 2567 โดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบ (Test Data Set) เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่ได้จากการฝึกด้วยข้อมูลในอดีต หลังการแปลงค่าพยากรณ์ที่อยู่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติกลับสู่หน่วยจริง โดยใช้วิธี Smearing Estimate พบว่า แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ ให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุด โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 19.15 รองลงมาคือ ARIMA (0,1,1)(0,1,1)₁₂ (MAPE = 22.23) และวิธีการถดถอยเชิงเส้น (MAPE = 22.44) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง

ตัวแบบ	บอกซ์-เจนกินส์			วินเทอร์	การถดถอย
	ARIMA (1,1,0)(0,1,1) ₁₂	ARIMA (0,1,1)(2,1,0) ₁₂	ARIMA (0,1,1)(3,1,0) ₁₂		
MAPE	22.23	22.97	22.78	19.15	24.44

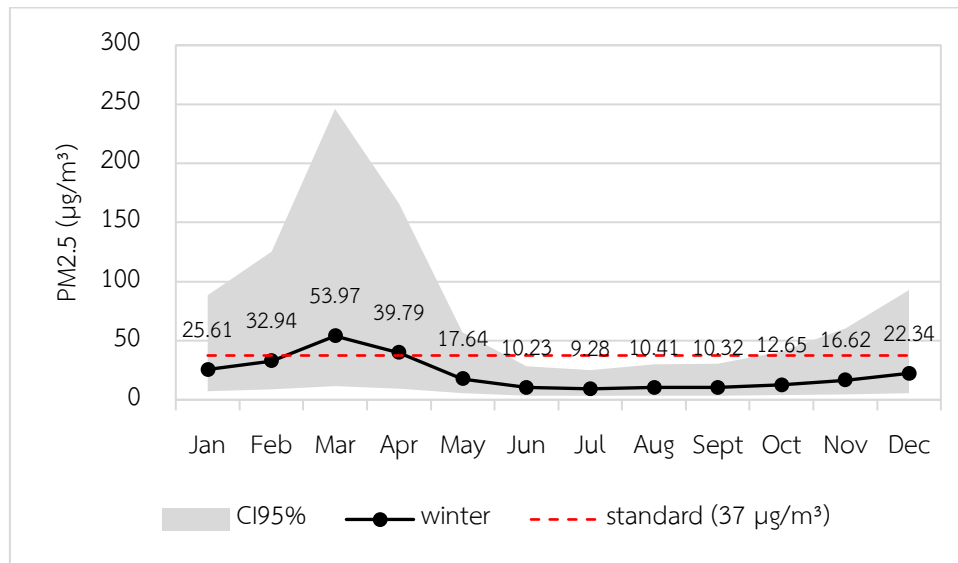
ผลการวิเคราะห์นี้บ่งชี้ว่าแบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ สามารถจับแนวโน้มและรูปแบบของข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบบจำลองด้วยวิธีบอกซ์-เจนกินส์จะมีความแม่นยำรองลงมา แต่ก็ยังถือว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันยังคงให้ผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ในทางกลับกันแบบจำลองด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นมีค่า MAPE สูงที่สุด ซึ่งอาจสะท้อนข้อจำกัดในการอธิบายตัวแปรแฝงหรือปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ได้ไม่ครบถ้วน



รูปที่ 7 แผนภาพการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อพยากรณ์พยากรณ์ด้วยแบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ ($\alpha = 0.4289$, $\gamma = 0.0005$, $\delta = 0.3377$) เมื่อแปลงข้อมูลในรูป $\ln(Y)$

รูปที่ 7 (ก) แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ ซึ่งพบการกระจายอย่างสม่ำเสมอของค่าคลาดเคลื่อน มีความคงที่ของความแปรปรวน ในขณะที่รูปที่ 7 (ข) แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลา พบว่าค่าคลาดเคลื่อนกระจายอย่างเป็นอิสระรอบค่าศูนย์ในทุกช่วงเวลา สะท้อน

ถึงลักษณะของความเป็นอิสระและไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนของความคลาดเคลื่อน ซึ่งสอดคล้องกับข้อสมมติของแบบจำลองที่ดี



รูปที่ 8 การพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ปี พ.ศ. 2568 โดยใช้แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ ($\alpha = 0.4289$, $\gamma = 0.0005$, $\delta = 0.3377$)

เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 สำหรับปี พ.ศ. 2568 พบว่าค่าพยากรณ์รายเดือนหลังจากการแปลงกลับเป็นค่าปกติได้แสดงผลค่าฝุ่นละออง PM2.5 ตามที่ปรากฏในรูปที่ 8 ซึ่งในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายน ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ที่ทำนายออกมาสูงกว่าเกณฑ์ที่กรมควบคุมมลพิษตั้งไว้ (≤ 37.5 มคก./ลบ.ม.) ซึ่งมีภาวะเสี่ยงต่อโรคและการเจ็บป่วยของประชาชน

6. สรุป

แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสามารถคาดการณ์ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ได้แม่นยำสูงสุด คือแบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ ซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริงน้อยกว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการถดถอยเชิงเส้น ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการศึกษาของอินทร์ สุขเกษม [16] ซึ่งเสนอว่าแบบจำลองการปรับให้เรียบมีความเหมาะสมในการพยากรณ์ค่าฝุ่น PM2.5 รายชั่วโมงและข้อมูลเฉลี่ย 24 ชั่วโมงในเขตเทศบาลนครนครราชสีมา ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์สามารถจับลักษณะเฉพาะของข้อมูล PM2.5 ได้ดีกว่า โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนของทุกปี ซึ่งค่าฝุ่นละออง PM2.5 มักพุ่งสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ วิธีวินเทอร์สามารถปรับน้ำหนักของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาและฤดูกาลได้อย่างยืดหยุ่น มีความได้เปรียบมากกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีถดถอยเชิงเส้น ที่มีข้อจำกัดในการอธิบายความผันแปรตามฤดูกาลผ่านตัวแปรหุ่นจำลอง ซึ่งอาจไม่สะท้อน พฤติกรรมจริงของข้อมูลได้ครบถ้วน ในขณะที่แบบจำลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ให้การทำนายที่แม่นยำใกล้เคียงกับวิธีวินเทอร์ แต่จุดอ่อนคือวิธีความซับซ้อนของการคำนวณกว่าวิธีอื่น ๆ

7. ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ แบบจำลองการปรับให้เรียบด้วยวิธีวินเทอร์ ในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ โดยพบว่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการปรับแนวโน้มในแบบจำลองนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ภาพรวมของแบบจำลองยังคงสามารถให้ผลการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้อย่างแม่นยำในระดับที่น่าพึงพอใจ อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่แบบจำลองอาจเกิดปัญหาจากการ Overfitting ซึ่งอาจทำให้การทำนายในข้อมูลใหม่ไม่แม่นยำเท่าที่ควร เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองในอนาคต ควรพิจารณาเพิ่มจำนวนข้อมูลฝึกหัด (Train Data Set) เพื่อให้แบบจำลองได้เรียนรู้จากข้อมูลที่หลากหลายและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงจากการ Overfitting และเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย นอกจากนี้ยังควรทบทวนและตรวจสอบข้อมูลที่อาจเป็นค่าผิดปกติ (Outliers) หรือข้อมูลที่ขาดหาย (Missing Data) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลลัพธ์การพยากรณ์ อีกหนึ่งแนวทางที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองคือ การพิจารณาสร้างแบบจำลองในระดับรายวัน ซึ่งจะช่วยเพิ่มจำนวนข้อมูลและความละเอียดในการทำนาย รวมทั้งช่วยให้สามารถจับลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่มีความผันผวนในระยะสั้นได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ การปรับปรุงดังกล่าวจะช่วยให้แบบจำลองมีความเสถียรและสามารถทำนายค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้แม่นยำยิ่งขึ้นในอนาคต

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองอื่น ๆ ในอนาคตสำหรับฝุ่นละออง PM2.5 ในเชียงใหม่ อาจพิจารณาการใช้ตัวแบบพยากรณ์แบบผสม (Hybrid Model) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความยืดหยุ่นในการพยากรณ์ เนื่องจากค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย การเพิ่มประสิทธิภาพในการพยากรณ์สามารถทำได้โดยการนำข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมเข้ามาประกอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ทิศทางและความเร็วลม จุดความร้อน (Hotspots) รวมถึงข้อมูลจากประเทศเพื่อนบ้านที่อาจส่งผลกระทบต่อมลภาวะในภาคเหนือ นอกจากนี้การนำเทคนิค Machine Learning ควรถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทางสถิติแบบดั้งเดิม เพื่อประเมินความแม่นยำของการพยากรณ์ ตลอดจนการพัฒนาแอปพลิเคชันหรือระบบแจ้งเตือนล่วงหน้า เพื่อสนับสนุนการวางแผนนโยบายและการดำเนินการของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเพิ่มขีดความสามารถของประชาชนในการรับมือกับจากฝุ่นละออง PM2.5 สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตไปสู่ระดับตำบลหรืออำเภอ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกสำหรับการจัดการปัญหาในแต่ละพื้นที่ได้ตรงจุด รวมถึงการใช้ ข้อมูลดาวเทียม เพื่อเพิ่มความครอบคลุมและความละเอียดของข้อมูล พร้อมกันนี้ภาครัฐควรพิจารณาดำเนินมาตรการเชิงรุกในช่วงที่ระดับฝุ่นละอองอยู่ในเกณฑ์วิกฤต อาทิ การสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การควบคุมยานพาหนะที่มีอัตราการปล่อยมลพิษสูง การบังคับใช้ข้อกำหนดในการจำกัดการเผาในที่โล่ง และการจำกัดกิจกรรมกลางแจ้งในพื้นที่เสี่ยง นอกจากนี้ ควรมีการจัดสรรทรัพยากรด้านสาธารณสุขอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อรองรับภาวะฉุกเฉินจากผลกระทบด้านสุขภาพ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานส่งเสริมและสนับสนุนวิชาการ 9, “PM2.5 ภัยไร้เสียง สถานการณ์ฝุ่นควัน PM2.5 ภาคเหนือตอนบน,” [ออนไลน์]. Available: https://olderlampang.dop.go.th/download/knowledge/th1716527042-130_0.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 10 พฤศจิกายน 2567).
- [2] อิดารัตน์ ผลพิบูลย์, อิศริย์ธิดา ชัยสวัสดิ์ และอนวัตร รุ่งพิสุทธิพงษ์, “ภัยในหน้าหนาวจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5),” วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 40-46, มกราคม – มิถุนายน, 2557.
- [3] กรมประชาสัมพันธ์, “ปัญหาฝุ่น PM2.5 ในภาคเหนือของไทย,” [ออนไลน์]. Available: <https://www.prd.go.th/th/content/category/detail/id/31/iid/340962> (เข้าถึงเมื่อ: 1 พฤศจิกายน 2567).

- [4] สำนักงานสิ่งแวดล้อมและควบคุมมลพิษที่ 1, “สรุปสถานการณ์ฝุ่นละออง PM2.5,” [ออนไลน์]. Available: <https://epo01.pcd.go.th/th/news/detail/173594/>. (เข้าถึงเมื่อ: 1 พฤศจิกายน 2567).
- [5] กรมควบคุมมลพิษ, “สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย ปี 2566,” [ออนไลน์]. Available: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2024/09/pcdnew-2024-09-23_07-36-26_390200.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 1 พฤษภาคม 2567).
- [6] วัฒนา ชยธวัช, “การพยากรณ์ค่าเฉลี่ยรายเดือนฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในจังหวัดเชียงใหม่ ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบแบบดั้งเดิม,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีชุมชน*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 5, หน้า 16-30, กันยายน – ตุลาคม, 2567.
- [7] ปรัชญา สิงหรวงศ์, “การพยากรณ์ฝุ่น PM2.5 ล่วงหน้าในจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้แบบจำลองหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว,” *สารนิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพมหานคร*, 2563.
- [8] R. J. Hyndman, and G. Athanasopoulos, *Forecasting: principles and practice*, 3rd edition. Melbourne, Australia: OTexts, 2021.
- [9] สุมิตรา เมืองขวา, “การพยากรณ์อนุกรมเวลาโดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์,” *วารสารและวารสารเวชศาสตร์เขตเมือง*, ปีที่ 63 ฉบับเพิ่มเติม, หน้า 185 – 192, กรกฎาคม 2562.
- [10] รณชัย ชื่นธวัช, “การพยากรณ์ค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนด้วยเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับรูปแบบออโตรีเกรสซีฟ,” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, หน้า 519 – 537, กันยายน – ธันวาคม, 2560.
- [11] วรางคณา เรียนสุทธิ์, “การคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ราคามะม่วงเขียวเสวย,” *วารสารศรีนครินทรวิโรฒวิจัยและพัฒนา สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 23, หน้า 52-62, มกราคม - มิถุนายน, 2563
- [12] C. Wongoutong, “Improvement of the Holt-Winters Multiplicative Method with a New Initial Value Settings Method,” *Thailand Statistician*, vol. 19, no.2, pp. 280–293, April, 2021.
- [13] ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์, “เทคนิคการพยากรณ์เชิงปริมาณ: การวิเคราะห์อนุกรมเวลา,” พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: มหาวิทยาลัยมหิดล, 2556.
- [14] เปรมพร เขมาวุฒม์ และ ชมพร ชาวบางแก้ว, “การศึกษาค่าปรับเรียบที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ไม่มีแนวโน้มและไม่มีฤดูกาล,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 245 – 256, เมษายน - มิถุนายน, 2564.
- [15] N. Duan, “Smearing estimate: a nonparametric retransformation method,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 78, no.383, pp. 605-610, September, 1983.
- [16] อินท์ฉัตร สุขเกษม, “การพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) จังหวัดนครราชสีมา,” รายงานการวิจัย, สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9, กรมควบคุมโรค, นครราชสีมา, 2563.

การทดสอบและศึกษาสมรรถนะใบพัดขณะบินลอยตัวภายใต้สภาวะที่ได้รับผลกระทบจากพื้น

Experimental Study of Hovering Rotor Performance with Ground Effect

เอกพล ไบโพธิ์¹, และ จิรวุฒิ คล่องตรวจโรค์^{2*}

^{1,2}กองวิชาวิศวกรรมอากาศยานและเทคโนโลยีการบิน กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Aekkapol Baipho¹ and Jiravud Klongtrujrok^{2*}

^{1,2}Aeronautical Engineering and Aviation Technology Division, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj

Royal Thai Air Force Academy

jiravud@rtaf.mi.th

Received 14 January 2025

Revised 20 September 2025

Accepted 05 August 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาคุณลักษณะและวิเคราะห์สมรรถนะการบินลอยตัวภายใต้ผลกระทบจากพื้นของใบพัด T-Motor สองขนาด คือ 40" × 13.1" และ 36" × 11.5" ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปฏิบัติการกู้ภัยของอากาศยานขึ้นลงทางดิ่ง (VTOL Aircraft) การทดลองดำเนินการที่ความเร็วรอบต่างๆ ในช่วงค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 6.49×10^5 ถึง 1.64×10^6 โดยศึกษาผลกระทบจากพื้นดินที่อัตราส่วนความสูงต่อรัศมี (z/R) เท่ากับ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 ที่ความเร็วรอบ 1,182 ถึง 3,607 รอบต่อนาที ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าใบพัดขนาด 40 นิ้วมีสมรรถนะการบินลอยตัวที่ดีกว่าใบพัดขนาด 36 นิ้ว เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลสมรรถนะของ T-Motor และผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเบลตเอเลเมนต์โมเมนต์ (BEMT) โดยมีค่าคุณภาพคำตอบ (Figure of Merit) สูงสุดเท่ากับ 0.42 ที่ความเร็วรอบ 2,365 RPM และระยะ z/R เท่ากับ 3 อย่างไรก็ตาม แนวโน้มผลกระทบจากพื้นดินที่ได้จากการทดลองไม่ได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้ตามทฤษฎี เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลสมรรถนะของ T-Motor และผลจาก BEMT ซึ่งอาจมีสาเหตุจากความปั่นป่วนของอากาศระหว่างการทดลองและการสูญเสียกำลังในการส่งถ่ายไปยังใบพัด

คำสำคัญ: ผลกระทบจากพื้น, ทฤษฎีโมเมนต์, สมรรถนะใบพัด

Abstract

The hovering performance of two T-Motor propellers, sized 40" × 13.1" and 36" × 11.5", under the influence of ground effect was experimentally investigated. This study is critical for understanding the operational capabilities of Vertical Takeoff and Landing (VTOL) aircraft in rescue missions. Experiments were conducted across a Reynolds number range of 6.49×10^5 to 1.64×10^6 , with rotor speeds varying from 1,182 to 3,607 rpm, and at height-to-radius ratios (z/R) of 1, 1.5, 2, 2.5, and 3 to assess ground effect. The results revealed that the 40-inch propeller outperformed

the 36-inch variant in hovering, achieving the maximum Figure of Merit of 0.42 at 2,365 RPM and a z/R of 3. Notably, the experimentally observed trends in ground effect deviated from theoretical predictions. Comparisons with both the manufacturer's (T-Motor) performance data and Blade Element Momentum Theory (BEMT) analysis indicated a tendency for the experimental values, suggesting potential impacts from air turbulence during testing and power transmission inefficiencies to the propellers.

Keywords: Ground Effect, Momentum Theory, Rotor Performance.

1. บทนำ

ผลกระทบจากพื้น (Ground Effect) มีความสำคัญต่อสมรรถนะของอากาศยาน [1] โดยเฉพาะในระหว่างการวิ่งขึ้นและลงจอดในบริเวณที่ใกล้ภูเขา ฝิวน้ำทะเล หรือพื้นคอนกรีต ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Interaction) [2] อากาศยานขึ้นลงทางดิ่ง (VTOL Aircraft) ที่ต้องอาศัยการบินลอยตัวได้รับผลกระทบโดยตรงต่อแรงขับและประสิทธิภาพของใบพัด การศึกษาสมรรถนะของใบพัดภายใต้ผลกระทบจากพื้นมักดำเนินการโดยปรับเปลี่ยนมุม รูปร่าง [3] หรือจำนวนกลีบพัด [4] รวมถึงระยะความสูงของใบพัดจากพื้นอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ [5] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่ใบพัดขนาดเล็ก ทั้งที่ในความเป็นจริง VTOL Aircraft มักใช้ใบพัดขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ อีกทั้งใบพัดเหล่านี้มักเป็นแบบมุมพิตช์คงที่ (Fixed-Pitch) ซึ่งต้องเพิ่มแรงขับและกำลังผ่านการปรับความเร็วรอบ ที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาสมรรถนะของใบพัดประเภทนี้ที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบ [6] อีกทั้งการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ใช้ค่าจากผลการทดสอบโดยตรง [7, 8] โดยไม่ได้คำนึงถึงกลไกการสร้างแรงขับของใบพัด [9] ส่งผลให้เกิดช่องว่างขององค์ความรู้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของใบพัด T-Motor ขนาด 40 นิ้ว และ 36 นิ้ว แบบมุมพิตช์คงที่ ทั้งในสถานะที่ไม่มีและมีผลกระทบจากพื้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลสมรรถนะของ T-Motor และทฤษฎีเบลตเอเลเมนต์โมเมนตัม (BEMT: Blade Element Momentum Theory) นอกจากนี้จะกล่าวถึงขอบเขตการวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การดำเนินงานวิจัยที่ประกอบด้วย การสร้างแท่นทดสอบ ติดตั้งระบบขับเคลื่อนและระบบวัดค่า พร้อมใช้ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) วิเคราะห์สมรรถนะของใบพัด [10] ผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยในการเลือกใช้ใบพัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับอากาศยานขึ้นลงทางดิ่งภายใต้ผลกระทบจากพื้น ต่อไปจะพูดถึงขอบเขตงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาเฉพาะคุณลักษณะแรงขับ (Thrust) และกำลัง (Power) ของใบพัดเดี่ยว (Single Rotor) เฉพาะในสถานะการสร้างแรงขับแนวดิ่งสำหรับการบินลอยตัว (Hovering Flight)

2.1.2 ศึกษาผลกระทบจากพื้น (In Ground Effect) ที่เกิดจากอัตราส่วนความสูงของใบพัดเทียบกับแผ่นพื้นอ้างอิงต่อรัศมี (z/R) และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบของมอเตอร์ (RPM)

2.1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพใบพัด (Figure of Merit) ระหว่างสภาวะที่มีผลกระทบจากพื้น (IGE) และสภาวะที่ไม่มีผลกระทบจากพื้น (OGE)

2.1.4 ไม่รวมการศึกษาพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ เช่น การไหลปั่นป่วนรอบจานใบพัด (Rotor Wake) และการไหลวนที่ปลายกลีบใบพัด (Blade Tip Vortices)

2.1.5 ไม่มีกลไกการเอียงของใบพัด (No Tilt Mechanism)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะพูดถึงทฤษฎีที่นำไปใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์ของใบพัดอากาศยานปีกหมุน ประกอบไปด้วย ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์และสมรรถนะของอากาศยานปีกหมุน และทฤษฎีผลกระทบจากพื้น ดังนี้

3.1 ทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์และสมรรถนะของอากาศยานปีกหมุน

ในการทดสอบใบพัดปีกหมุนนั้นมีเงื่อนไขทางการบินคือ การบินแบบลอยตัว เมื่อแรงขับและน้ำหนักมีขนาดเท่ากันในแนวดิ่ง แต่มีทิศตรงกันข้ามเพื่อรักษาสมดุลของแรงทั้งสองชนิด โดยจะใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์สมรรถนะใบพัด คือ สมการพื้นฐานทางอากาศพลศาสตร์ และทฤษฎีโมเมนตัม [10]

3.1.1. ทฤษฎีโมเมนตัม

ทฤษฎีโมเมนตัมได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แรงขับ เนื่องจากการไหลผ่านระบบที่สนใจ หรือ ปริมาตรควบคุมที่กำหนด (Control Volume: CV) ในกรณีของอากาศยานปีกหมุนได้นำทฤษฎีนี้มาวิเคราะห์เพื่อหาแรงขับที่เกิดขึ้น โดยตั้งสมมติฐานของทฤษฎีดังกล่าว คือ มีการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniformed Flow) การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) และไม่มีมีการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อผ่านแผ่นจานใบพัด (Rotor Disk Plane) ในการคำนวณใบพัดนั้นจะพิจารณากระแสอากาศจากหยุดนิ่ง รับอากาศผ่านแผ่นจานปีกหมุน ทำให้เกิดความเร็วเหนี่ยวนำ (Induced Velocity) เมื่ออากาศผ่านแผ่นจานจะมีความเร็วเป็นสองเท่าของความเร็วเหนี่ยวนำ เรียกว่า อากาศไหลวนที่ไกลจากใบพัด (Far Wake) [10] ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมขณะที่กระแสอากาศผ่านแผ่นจานเปรียบเทียบกับก่อนรับอากาศเข้า จะทำให้สามารถหาแรงขับ (Thrust) ได้ และอัตราการไหลของอากาศที่วิ่งผ่านแผ่นจานนั้นสามารถหาด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ซึ่งมีผลจากอัตราการไหลของมวล ตามสมการที่ 1 จะพิจารณาอากาศขณะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นจาน จะได้ความสัมพันธ์คือ ความหนาแน่นของอากาศ พื้นที่ของแผ่นจาน และความเร็วเมื่อผ่านแผ่นจาน ซึ่งเป็นความเร็วเหนี่ยวนำจากสมการที่ 2 เมื่อย้ายข้างตัวแปรแล้ว จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปของความเร็วเหนี่ยวนำได้ ในกรณีการบินแบบลอยตัว แรงขับจะเท่ากับน้ำหนักวิ่งขึ้น (Takeoff Weight: W_{TO}) ของอากาศยานปีกหมุน เมื่อต้องการหาค่ากำลังจะใช้กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ในการคำนวณกำลังในอุดมคติ (Ideal Power) ตามสมการที่ 3 โดยหมายถึงกำลังที่เกิดขึ้นโดยไม่คำนึงถึงผลของความหนืด (Viscous Effects) จะสามารถเขียนสมการกำลังได้ว่า

$$T = \dot{m}w = (\rho A v_i)(2v_i) \quad (1)$$

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{T}{A}\right) \frac{1}{2\rho}} = \frac{P}{T} = (PL)^{-1} \quad (2)$$

$$P_i = T v_i = \frac{T^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (3)$$

T = แรงขับ หน่วย นิวตัน (N)

A = พื้นที่แผ่นจาน หน่วย ตารางเมตร (m^2)

$\frac{T}{A}$ = ภาระแผ่นจาน หน่วย นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศเทียบระดับน้ำทะเล หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

v_i = ความเร็วเหนี่ยวนำ หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

PL = ภาระกรรมกำลัง หน่วย นิวตันต่อวัตต์ (N/Watt)

คุณลักษณะของใบพัดเบื้องต้น เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานปีกหมุน ความยาวคอर्ड และจำนวนกลีบใบพัด สามารถนำมาเทียบอัตราส่วนระหว่างพื้นที่กลีบใบพัดทั้งหมดต่อแผ่นจานใบพัด เรียกว่า ค่าความตันของใบพัด (Rotor Solidity) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของใบพัด ค่าทั่วไปของใบพัดเฮลิคอปเตอร์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.07 ถึง 0.12 จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{N_b c}{\pi R} \quad (4)$$

N_b = จำนวนกลีบใบพัด

c = ความยาวคอर्डกลีบใบพัด หน่วย เมตร (m)

R = รัศมีกลีบใบพัด หน่วย เมตร (m)

σ = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่กลีบใบพัดทั้งหมดต่อแผ่นจานใบพัด

3.1.2. การวิเคราะห์สมรรถนะของใบพัด

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณตัวแปรต่างๆ จะถูกจัดอยู่ในรูปแบบของตัวแปรสัมประสิทธิ์ไร้หน่วย ในส่วนที่เป็นสมรรถนะของใบพัดจะใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ (C_T) สัมประสิทธิ์แรงบิด (C_Q) และสัมประสิทธิ์กำลัง (C_P) โดยที่จะต้องทราบความเร็วรอบ (RPM) ของใบพัด เพื่อที่หาความเร็วที่ปลายกลีบใบพัด (Blade Tip Speed) ได้ตามสมการด้านล่าง

$$C_T = \frac{T}{\rho A V_{tip}^2} \quad (5)$$

$$C_Q = \frac{T}{\rho A V_{tip}^2 R} \quad (6)$$

$$C_P = \frac{T}{\rho A V_{tip}^3} \quad (7)$$

V_{tip} = ความเร็วปลายกลีบใบพัด หน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

Q = แรงบิด หน่วย นิวตัน-เมตร (N-m)

P = กำลัง หน่วย วัตต์ (Watt)

C_T = ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ

C_Q = ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

C_P = ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง

ในการพิจารณาสมรรถนะแรงขับในการบินลอยตัวของเฮลิคอปเตอร์ที่ดีจะใช้ตัวชี้วัดด้วยค่าคุณภาพของคำตอบซึ่งนิยามคือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ต้องการแบบอุดมคติต่อกำลังที่ต้องการแบบใช้งานจริงขณะบินลอยตัวในกรณีทีวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีโมเมนตัมจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเสมอ สมการค่าคุณภาพคำตอบสามารถเขียนได้ว่า

$$FM = \frac{C_{P_{ideal}}}{C_{P_{actual}}} = \frac{\frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2}}}{\frac{kC_T^{3/2}}{\sqrt{2}} + \frac{1}{8}\sigma C_{d_0}} \quad (8)$$

จะได้ว่า

FM = ค่าคุณภาพคำตอบ

k = ค่าปัจจัยปรับปรุงกำลังเหนี่ยวนำ

C_{d_0} = ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อแรงยกเท่ากับศูนย์

ค่าปัจจัยปรับปรุงกำลังเหนี่ยวนำ (Induced Power Correction Factor หรือ Induced Power Factor) นั้น ได้มาจากการทดสอบใบพัดหรือการทดสอบในขณะบินจริง ซึ่งค่าดังกล่าวนี้บ่งบอกถึงความเป็นอุดมคติ ไม่ว่าจะเป็น การไหลที่ไม่สม่ำเสมอ การสูญเสียที่ปลายปีกของใบพัด หรือการเกิดกระแสวน กรณีค่า k มีค่าเท่ากับ 1 นั้นหมายความว่า ไม่มีการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำในอุดมคติ และโดยทั่วไป ค่า k เท่ากับ 1.15 ใช้ในกรณีมีการสูญเสียแบบไม่เป็นอุดมคติ (Non-ideal Losses) ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์กำลังติดตัว เมื่อไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่แรงยกเท่ากับศูนย์ (C_{d_0}) ซึ่งเกิดจากแรงต้านของรูปร่างต่างๆ ตั้งสมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่แรงยกเท่ากับศูนย์เท่ากับ 0.01 เป็นข้อมูลจากสไลด์ใบพัดที่ใช้โดยทั่วไป

3.2 ผลกระทบจากพื้น (Ground Effects)

ผลกระทบจากพื้นเป็นพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนที่ทำให้เงื่อนไขการบินมีความซับซ้อน โดยส่งผลให้แรงยกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อบินอยู่ใกล้พื้นมากขึ้นในกรณีของอากาศยานปีกหมุนและอากาศยานปีกตรึง เกิดจากการที่อากาศถูกเหนี่ยวนำมากขึ้นเข้าสู่ใบพัดเพื่อสร้างแรงขับ ซึ่งทำให้ปริมาณกระแสอากาศไหลวนที่เกิดขึ้นที่ปลายใบพัดนั้นลดลง เนื่องจากอยู่ใกล้บริเวณพื้นทำให้มุมปะทะที่เกิดจากใบพัดนั้นไม่มีความเร็วเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเมื่อวิ่งผ่านโรเตอร์ ทำให้แรงขับจึงเพิ่มขึ้นด้วยกำลังคงที่ดังสมการต่อไปนี้ [7, 10]

$$\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{4z}\right)^2} \quad (9)$$

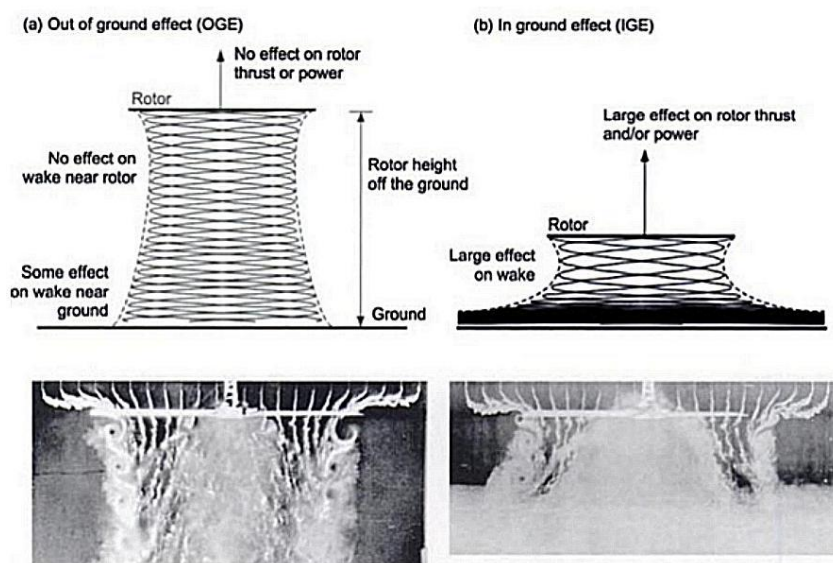
มีความหมายว่า

Z = ระยะความสูงระหว่างพื้นเทียบกับใบพัด หน่วย เมตร (m)

T_{IGE} = แรงขับที่มีผลจากผลกระทบจากพื้น

T_{OGE} = แรงขับที่ไม่มีผลจากผลกระทบจากพื้น

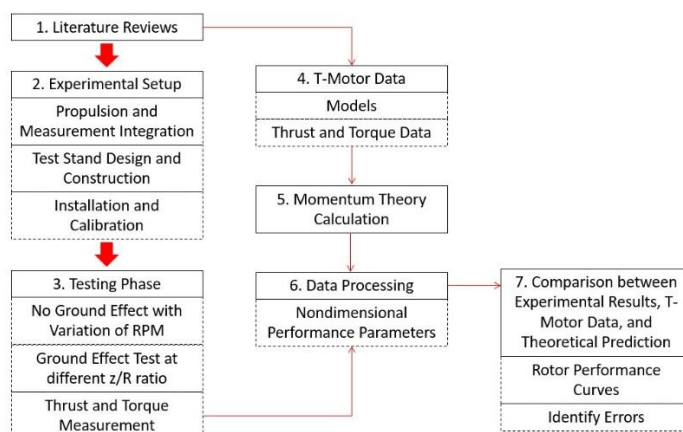
รูปที่ 1 แสดงภาพการไหลของอากาศไหลวนที่มีผลกับระดับความสูงที่เมื่ออยู่ไกลพื้น และเมื่ออยู่ใกล้พื้นมีผลที่ทำให้แรงขับเพิ่มขึ้นเนื่องจากอากาศมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นมากขึ้นจากการไหลในแนวตั้งไปสู่การไหลตามแนวเดียวกับพื้น



รูปที่ 1 การแสดงภาพของวิถีอากาศไหลวนของความสูงที่แตกต่างกัน (แหล่งอ้างอิง [5])

4. การดำเนินการวิจัย

รูปที่ 2 ได้แสดงถึงภาพรวมการดำเนินการ ซึ่งจะต้องทำการทบทวนวรรณกรรม และสำรวจข้อมูลใบพัดของ T-Motor เพื่อที่จะใช้ในการเลือกชุดระบบขับเคลื่อนและระบบเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นพิจารณาการออกแบบ และการสร้างแท่นทดสอบพร้อมกับติดตั้งแท่นทดสอบ ต่อไปเป็นส่วนของการทดสอบโดยมีการทดสอบตามความเร็วรอบและระยะความสูงเพื่อเก็บค่าแรงขับและแรงบิด และวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถนะตามข้อมูลจาก T-Motor และข้อมูลในการทดสอบให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ควบคู่กับการใช้การคำนวณด้วยทฤษฎีโมเมนตัม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างผลการทดสอบ สมรรถนะของ T-Motor และการใช้ทฤษฎีโมเมนตัมในการพิจารณาผลกระทบจากพื้น

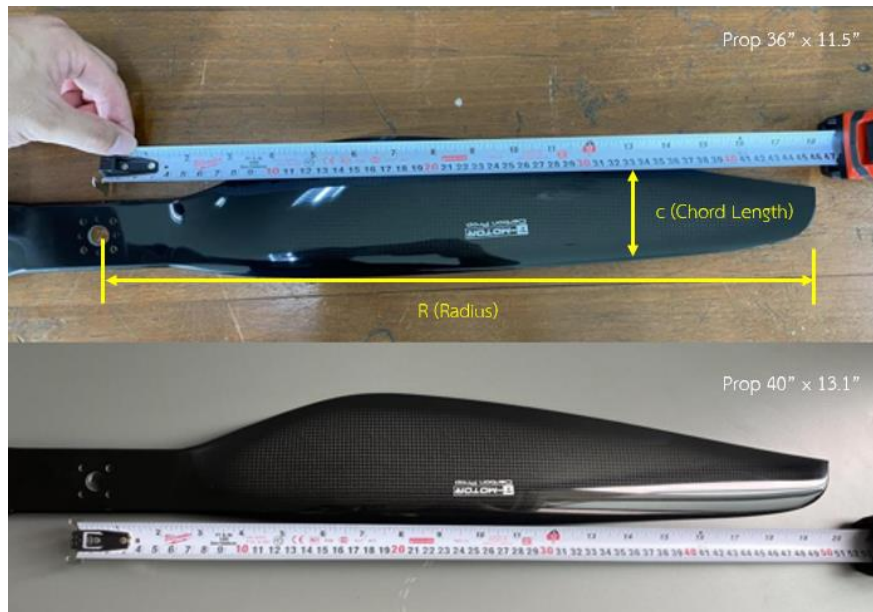


รูปที่ 2 ภาพรวมการดำเนินการ

ข้อมูลอ้างอิงเพื่อใช้ในการทดสอบใบพัดใช้ข้อมูลของ T-Motor เป็นผู้ผลิตมอเตอร์และใบพัดสำหรับอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งถูกนำไปใช้ในการติดตั้งระบบขับเคลื่อนในด้านอุตสาหกรรมการบิน เช่น อากาศยานที่มีคนขับ (Manned Aircraft) อากาศยานไร้คนขับ (UAV) อากาศยานขึ้นลงทางดิ่ง (VTOL) เป็นต้น ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลสมรรถนะด้านแรงขับ แรงบิด และกำลัง ตามความเร็วรอบต่างๆ และข้อมูลใบพัดที่เหมาะสมกับมอเตอร์ที่เลือกใช้ [11] รวมทั้งใบพัดแบบคาร์บอน-ไฟเบอร์ (Carbon Fiber Propeller) ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบหาแรงขับ แรงบิดและกำลัง [12, 13] ในการเลือกขนาดของมอเตอร์นั้นเลือกจากการใช้ขนาดใหญ่ที่สุดของ T-motor คือ มอเตอร์รุ่น U15 II KV100 โดยมอเตอร์ที่เลือกใช้นั้นได้รับขนาดของใบพัดไว้ทั้งหมดมี 2 ขนาดคือ $40'' \times 13.1''$ และ $36'' \times 11.5''$ รวมทั้งขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบบลิเทียมโพลิเมอร์ (LiPo) 6S, 16,000 mAh, 22.2 โวลต์, 25C ต่ออนุกรมจำนวน 2 ตัว และ T-Motor FLAME 200A, 14S Electronic Speed Controller (ESC) จากมอเตอร์ที่เลือกใช้ แต่ละอุปกรณ์ในส่วนนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบขับเคลื่อน นอกจากนี้ยังบอกถึงข้อมูลความเร็วรอบตั้งแต่ 50 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ตามข้อมูลดังตารางที่ 1 สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ 2 ส่วน คือ คุณสมบัติของใบพัดและสมรรถนะของใบพัดที่ได้ทดสอบเทียบระดับน้ำทะเล ในส่วนที่เป็นข้อมูลชนิดของใบพัดทั้งขนาด $40'' \times 13.1''$ และ $36'' \times 11.5''$ โดยทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะพิทช์ ความยาวคอร์ดที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่ง 75 เปอร์เซ็นต์ ของรัศมีใบพัด ทำให้สามารถหาค่าความตันของใบพัด และอัตราส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Pitch-to-Diameter Ratio) และค่าคุณสมบัติอื่นๆ ได้

4.1. ข้อมูลคุณลักษณะของกลีบใบพัด

ใบพัดของ T-Motor ที่เลือกใช้ทั้งสองชนิดคือ $40'' \times 13.1''$ และ $36'' \times 11.5''$ ดังรูปที่ 3 เลขตัวแรก คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคูณกับระยะพิทช์ที่กลีบใบพัดเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ มีหน่วยเป็นนิ้ว เมื่อได้ขนาดของกลีบใบพัดต่างๆ แล้ว สามารถใช้การวัดเพื่อหาความยาวคอร์ดที่ตำแหน่ง 75 เปอร์เซ็นต์ ของรัศมีกลีบใบพัดได้ และมีจำนวน 2 กลีบใบพัด ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความตันของใบพัดมีค่าเท่ากันที่ 0.191 ป่งบอกถึงคุณลักษณะของใบพัดมีความเหมือนกัน เช่นเดียวกันกับค่าเรย์โนลด์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ให้มีการตั้งสมมติฐานว่าได้ทดสอบในสภาวะเดียวกัน



รูปที่ 3 ใบพัดขนาด 40" x 13.1" และ 36" x 11.5"

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณลักษณะใบพัดขนาด 40" x 13.1" และ 36" x 11.5"

Propeller	Pitch-to-Diameter Ratio (-)	Rotor Solidity $\sigma(-)$	Maximum Reynolds Number $Re_{max}(-)$
40" x 13.1"	0.3275	0.191	1,640,571
36" x 11.5"	0.3194	0.191	1,621,917

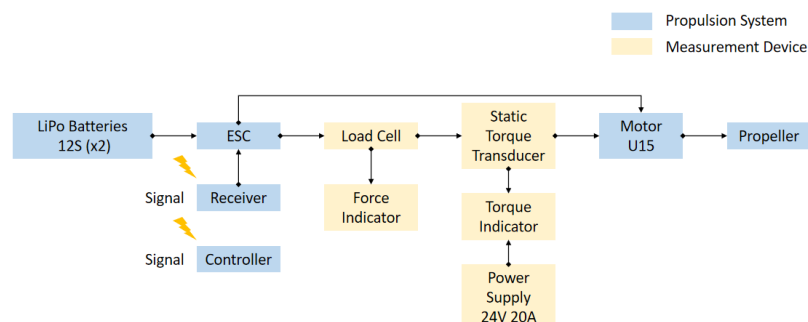
เมื่อวัดขนาดของใบพัดทั้ง 2 ชนิด การสร้างแรงขับของใบพัดได้คือ แรงยก ซึ่งเกิดจากลักษณะหน้าตัดของใบพัดที่เรียกว่า แพนอากาศ ซึ่งได้ทำการวัดเพื่อหาขนาดรูปร่างที่ใกล้เคียง โดยเปรียบเทียบที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ของรัศมีใบพัด แพนอากาศของใบพัดแบบคาร์บอน-ไฟเบอร์ จะเลือกใช้แบบ NACA-0012 ซึ่งถูกใช้ในการทดสอบแรงขับ และกำลังของใบพัด [13]

4.2. ระบบขับเคลื่อนและเครื่องมือวัด

ข้อมูลจาก T-Motor หรือจากการทดสอบจะทราบค่า ความเร็วรอบ แรงขับ แรงบิด และกำลัง และอุปกรณ์ในการทดสอบจริงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือวัด จากข้อมูลของ T-Motor ค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้อยู่ที่ 37 kg และค่าแรงบิดสูงสุด 17.8 N-m เพื่อที่สามารถรับภาระการทดสอบได้

ในการเลือกเครื่องมือวัดเพื่ออ่านค่าและเก็บค่าสมรรถนะที่ได้พุดถึงในข้างต้น โดยใช้โหลดเซลล์ (Load Cell) และเซนเซอร์วัดแรงบิดสถิต (Static Torque Transducer) ในการอ่านค่าความเร็วรอบ แรงดึง และแรงบิดที่เกิดขึ้นจากตัวกลีบใบพัดและมอเตอร์ โหลดเซลล์ที่ใช้จะวัดค่าแรงดึงเพียงอย่างเดียวที่ทำให้ได้ค่าแรงขับออกมา ใช้แรงดึงสูงสุด 50 kg และมีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.005 N-m และเซนเซอร์วัดแรงบิดสถิตจะทำการอ่านค่าความเร็วรอบ และแรงบิดจากการหมุนและแรงที่กลีบใบพัดกระทำกับมอเตอร์ มีค่าแรงบิดสูงสุดคือ 20 N-m ใช้ค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.1 RPM และ 0.005 N-m ตามลำดับ ทั้งสองอุปกรณ์นั้นมีการรับแรงดึงและแรงบิดที่เพียงพอ นอกจากนี้มีการ

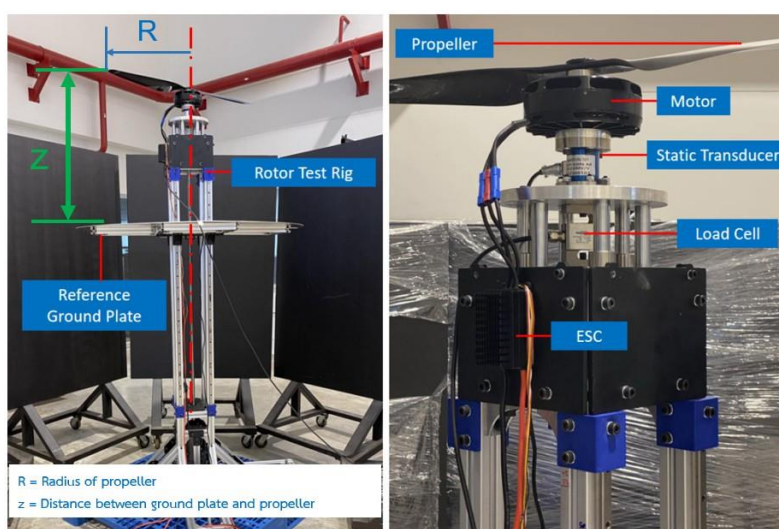
ทดสอบด้วยการสอบเทียบ (Calibration) ที่อุปกรณ์โหลดเซลล์และเซนเซอร์วัดแรงบิดสถิต [14, 15] ส่วนกำลังที่เกิดจากใบพัดนั้นสามารถทำการคำนวณได้เมื่อทราบความเร็วรอบและแรงบิดที่เกิดขึ้นตามรอบต่างๆ รูปที่ 4 จะแสดงวิธีการต่อวงจรขับเคลื่อนใบพัดทั้งหมดในขณะที่ใบพัดหมุน รวมถึงความสัมพันธ์ในการต่ออุปกรณ์การอ่านค่าต่างๆ ในการทำงานของระบบทั้งสองแบบนี้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม (Controller) และส่งคำสั่งไปที่ตัวรับสัญญาณ (Receiver) ในการรับสัญญาณจากอินพุต (Input) ซึ่งคือค่าความเร็วรอบที่ถูกควบคุม จากนั้นตัวรับสัญญาณจะต่ออยู่กับ ESC ในการควบคุมความเร็วรอบเพื่อส่งผ่านมอเตอร์อีกครั้ง และทำให้ใบพัดทำงานได้



รูปที่ 4 วงจรขับเคลื่อนและการอ่านค่าแรงขับและแรงบิด

4.3. การออกแบบ การสร้าง และการติดตั้งแท่นทดสอบ

เมื่อทราบค่าแรงดึงและแรงบิดสูงสุดในการทดสอบจะมีผลต่อส่วนสุดท้ายที่จะต้องแผนแบบคือ การสร้างแท่นทดสอบจะต้องมีความแข็งแรงเพื่อทนต่อแรงบิดของการหมุนของใบพัด นอกจากนี้วัสดุที่ใช้แผนแบบแท่นทดสอบนั้นใช้เป็น แท่งอลูมิเนียม (AL-3030 Frame) มีขนาด 40 x 40 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่ใช้กับบริเวณลำตัวของแท่น โดยมีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และเนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา ทางผู้ผลิตจึงได้แผนแบบตัวฐานของแท่นให้มีย่านักเยาะเพื่อถ่วงไม่ให้ตัวแท่นเกิดการส่ายหรือลอยตัวได้ ส่วนประกอบของโครงสร้างแท่นนั้นจะมี 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนด้านบนที่ทำการยึดตัว มอเตอร์และใบพัด พร้อมทั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัด คือ โหลดเซลล์และเซนเซอร์วัดแรงบิดสถิตซึ่งทำหน้าที่วัดค่าแรงต่างๆ โดยขนาดภาพรวมของแท่นทดสอบที่แผนแบบแล้ว มีความสูง 2.145 เมตร และกว้าง 1.24 เมตร เมื่อวัดขนาดฐาน เมื่อรวมกับติดตั้งกลีบใบพัด และทำการติดตั้งระบบขับเคลื่อนและตัววัดค่าระบของแท่นทดสอบใบพัด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แท่นทดสอบใบพัด

4.4. การดึงล่วงหน้าและการเก็บข้อมูลในการทดสอบเพื่อการเปรียบเทียบ

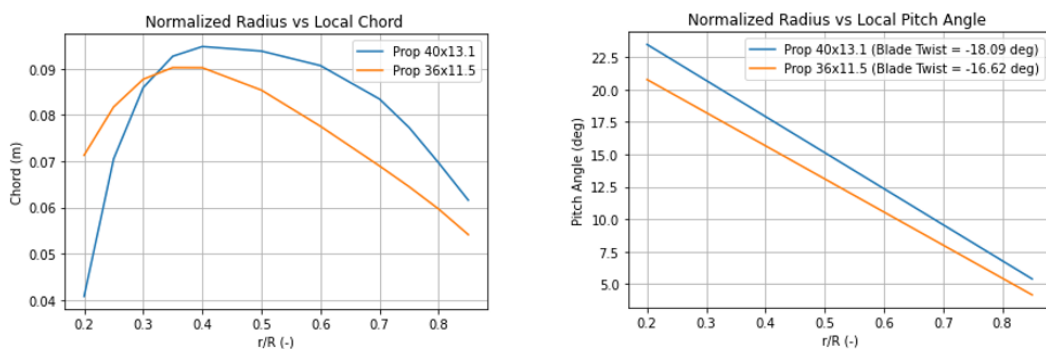
ก่อนเริ่มการทดสอบจำเป็นต้องใช้วิธีการดึงล่วงหน้า (Pre-Tension) เพื่อตั้งค่าแรงของโหลดเซลล์เพื่อให้พร้อมต่อการทำการทดสอบจริงเพื่อเก็บค่าสมรรถนะแรงขับ แรงบิด และกำลัง ตามความเร็วรอบตั้งแต่ 1,182 - 2,956 RPM และ 1,443 - 3,607 RPM ด้วยขนาดใบพัด 40" x 13.1" และ 36" x 11.5" ตามลำดับ จัดให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ แผ่นพื้นอ้างอิงของแท่นทดสอบปรับตามระยะห่างระหว่างแผ่นพื้นอ้างอิงและปลายกลีบใบพัดที่กำหนดทั้งหมด 5 ระดับ ที่กำหนดคือ อัตราส่วนความสูงของใบพัดเทียบกับแผ่นพื้นอ้างอิงต่อรัศมีใบพัด (z/R) เท่ากับ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 เท่า เมื่อได้ผลของค่าสมรรถนะต่างๆ จากการทดสอบใบพัด จะถูกจัดให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ พร้อมทั้งข้อมูลสมรรถนะของ T-Motor เพื่อนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะใบพัดจาก T-Motor และความสัมพันธ์ของผลกระทบจากพื้นตามทฤษฎีโมเมนตัม เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์แนวโน้มในการเกิดผลกระทบจากพื้น หรือปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะใบพัด

5. ผลการวิจัย

ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะและสมรรถนะของใบพัดขนาด 40" x 13.1" และ 36" x 11.5" จากการทดสอบข้อมูล T-Motor และผลจากการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบไม่มีผลกระทบจากพื้นและมีผลกระทบจากพื้น

5.1. คุณลักษณะของใบพัด

เมื่อทำการวัดมุมกลีบใบพัด (Pitch Angle) ตั้งแต่โคนกลีบใบพัดกำหนดให้เท่ากับ 20 องศาของรัศมีจนถึง 90 องศาของรัศมีปลายกลีบใบพัด โดยอยู่ในรูปของค่ารัศมีตัวแปรไร้หน่วย (y/R) ที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 เมื่อพิจารณาผลต่างจากปลายถึงโคนกลีบใบพัดจะได้มุมบิดของกลีบใบพัดซึ่งจะมีค่าเป็นลบ ตามรูปที่ 6 การบิดของใบพัดแบบ 40" x 13.1" มีค่าเท่ากับ 18.09 องศา และ 36" x 11.5" มีค่าเท่ากับ 16.62 องศา

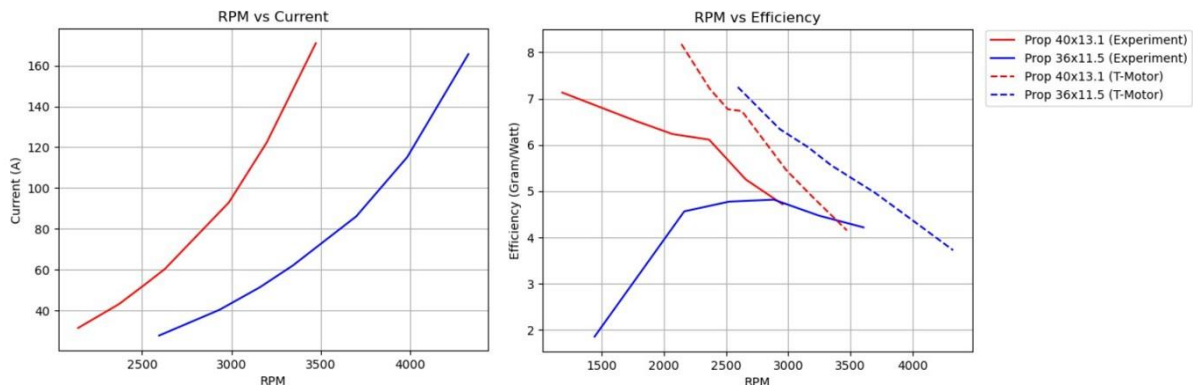


รูปที่ 6 ความยาวคอร์ดตามแนวรัศมีและมุมบิดของใบพัด 40" x 13.1" และ 36" x 11.5"

5.2. การเปรียบเทียบผลสมรรถนะใบพัด

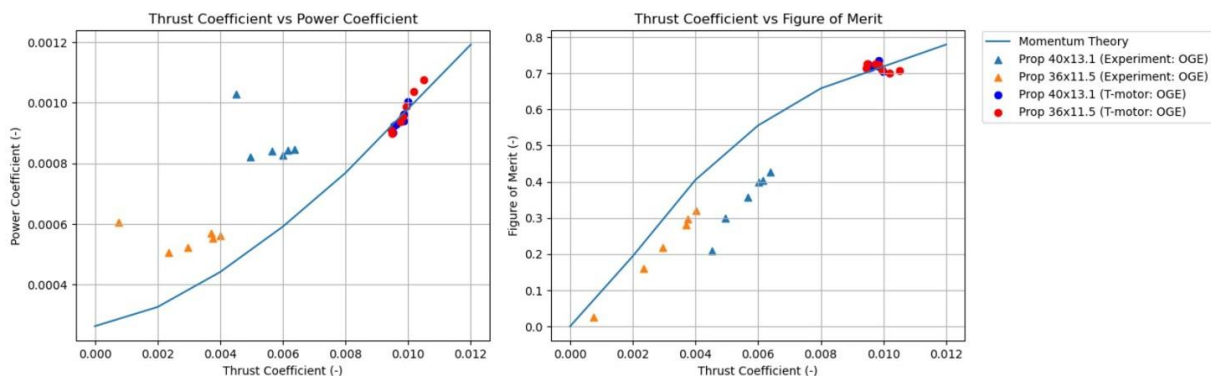
จากรูปที่ 7 จากกราฟทางด้านซ้ายแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM ของมอเตอร์ กับกระแสไฟฟ้า จะเห็นว่าเมื่อ RPM สูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ดึงไปใช้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ที่ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ RPM สูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร่งขึ้น ส่วนกราฟทางด้านขวาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง RPM กับประสิทธิภาพ จะเห็นว่าประสิทธิภาพไม่ได้แปรผันตรงกับ RPM เสมอไป

สำหรับใบพัด Prop 36x11.5 (เส้นสีน้ำเงินทึบ) ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นในช่วง RPM ต่ำถึงปานกลาง และเริ่มลดลงเมื่อ RPM สูงขึ้น ในขณะที่ใบพัด Prop 40x13.1 (เส้นสีแดงทึบ) แสดงแนวโน้มที่ประสิทธิภาพลดลงเมื่อ RPM สูงขึ้น



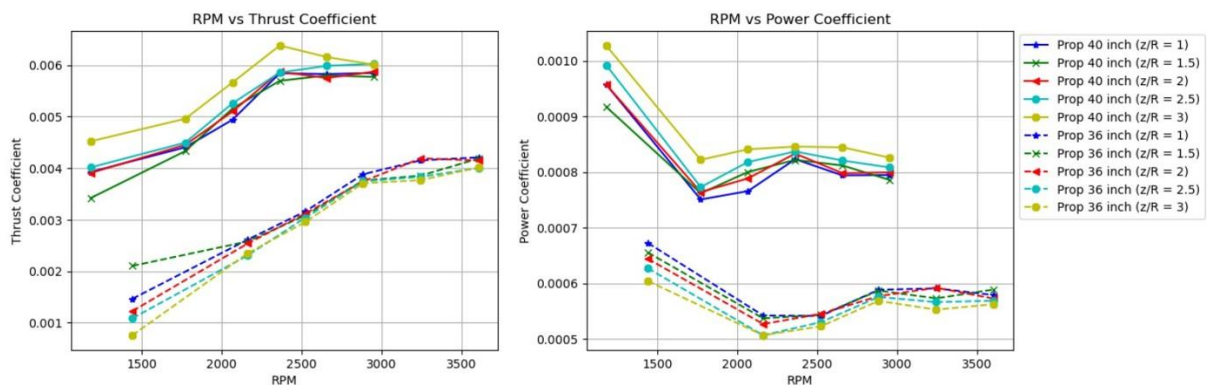
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าตามความเร็วรอบ (ด้านซ้าย) และความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพตามความเร็วรอบ (ด้านขวา)

จากรูปที่ 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงขับกับสัมประสิทธิ์กำลัง (ด้านซ้าย) และสัมประสิทธิ์แรงขับกับค่าคุณภาพคำตอบ (ด้านขวา) ทฤษฎีโมเมนตัมแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของทั้งสัมประสิทธิ์กำลังและค่าคุณภาพคำตอบตามการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงขับ ข้อมูลจากการทดสอบโดยทั่วไปมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและค่าคุณภาพคำตอบที่สูงกว่าทฤษฎีเล็กน้อย และมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นทฤษฎีเมื่อสัมประสิทธิ์แรงขับเพิ่มขึ้น ซึ่งใบพัด 40 นิ้ว ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงกว่าใบพัด 36 นิ้ว ที่สัมประสิทธิ์แรงขับเดียวกัน ส่วนข้อมูล T-Motor มีการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลบนเส้นทฤษฎีทั้งในกราฟด้านซ้ายและด้านขวา ในการทดสอบมีการกระจายตัวของข้อมูลมากกว่า และสามารถทำงานได้ในช่วงสัมประสิทธิ์แรงขับที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูล T-Motor ค่าคุณภาพคำตอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัมประสิทธิ์แรงขับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าใบพัด 40 นิ้วมีประสิทธิภาพการบินลอยตัวที่ดีกว่าใบพัด 36 นิ้ว เนื่องจากมีค่าคุณภาพคำตอบที่สูงกว่า (สูงสุดประมาณ 0.42 เทียบกับ 0.32) เป็น 23.809 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างจาก T-Motor ค่าคุณภาพคำตอบจากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าข้อมูล T-Motor มีความแตกต่างเท่ากับ 42.857 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการติดตั้งใบพัด กระแสลมปั่นป่วน และการสูญเสียกำลังในการส่งผ่าน



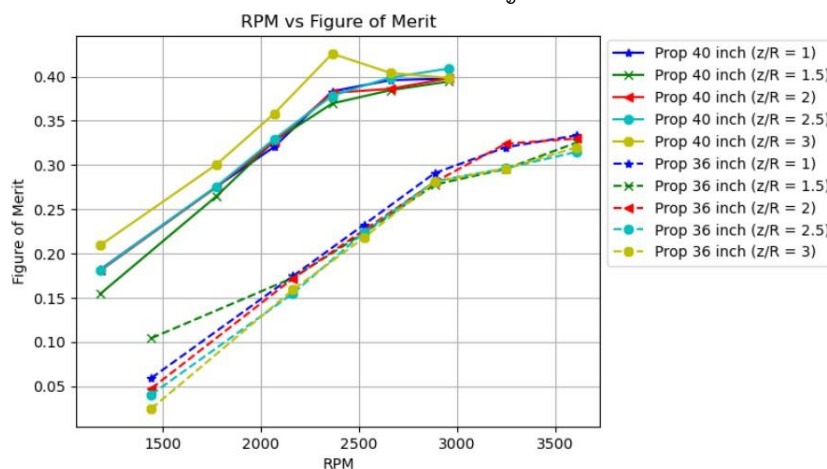
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงขับและค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (ด้านซ้าย) และความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงขับและค่าคุณภาพคำตอบ (ด้านขวา)

ดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) กับสัมประสิทธิ์แรงขับ (ด้านซ้าย) และสัมประสิทธิ์กำลัง (ด้านขวา) รูปกราฟด้านซ้าย โดยทั่วไป เมื่อ RPM เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์แรงขับจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แล้วจึงเริ่มลดลงใบพัด 40 นิ้ว ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับที่สูงกว่าใบพัด 36 นิ้ว ในช่วง RPM ที่พิจารณา ใบพัด 40 นิ้ว ($z/R = 3$) ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับสูงสุดที่ประมาณ 0.0065 ที่ RPM ประมาณ 2,365 หลังจากนั้นค่าจะลดลง การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงขับหลังจากจุดสูงสุด อาจเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของแรงขับไม่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของ RPM อย่างมาก รูปกราฟด้านขวา เมื่อ RPM เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์กำลังมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก จากนั้นเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ใบพัด 36 นิ้ว โดยทั่วไปมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำกว่าใบพัด 40 นิ้ว ใบพัด 36 นิ้ว ($z/R = 3$) มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังต่ำสุดประมาณ 0.0005 ที่ RPM ประมาณ 2,100



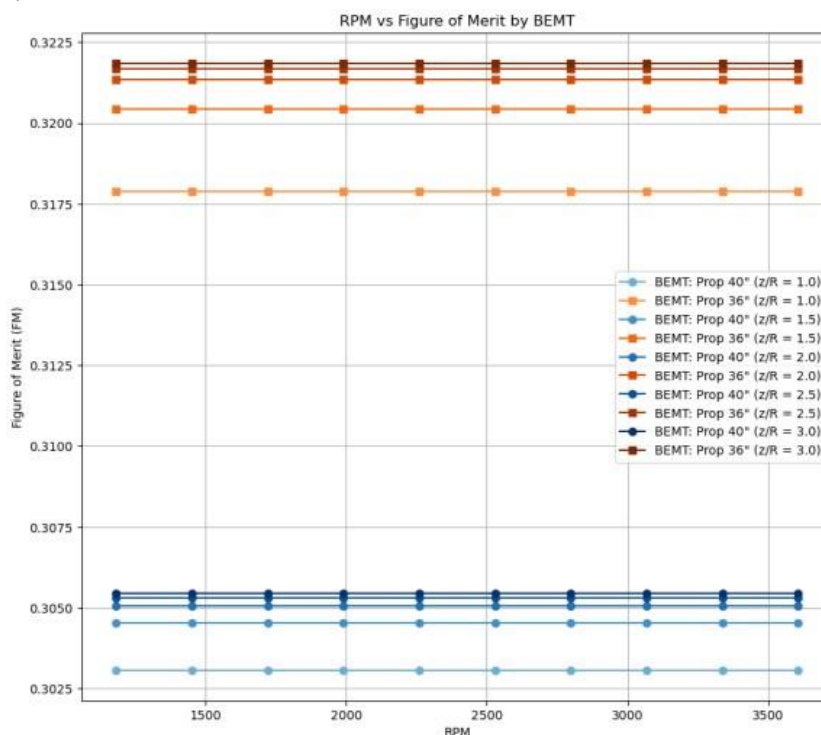
รูปที่ 9 ความเร็วรอบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ (ด้านซ้าย) และต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (ด้านขวา) ตามความแตกต่างของระดับความสูง z/R

จากรูปที่ 10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ RPM กับค่าคุณภาพคำตอบ ค่าคุณภาพคำตอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม RPM ในช่วงแรก จากนั้นจะเริ่มลดลงหรือคงที่หลังจากถึงจุดสูงสุด โดยทั่วไปใบพัด 40 นิ้ว ให้ค่าคุณภาพคำตอบที่สูงกว่าใบพัด 36 นิ้ว ในช่วง RPM ที่พิจารณา ใบพัด 40 นิ้ว ($z/R = 3$) ให้ค่าคุณภาพคำตอบสูงสุดประมาณ 0.42 ที่ 2,365 RPM สำหรับใบพัดแบบ 40 นิ้ว ระยะความสูงต่อรัศมีของใบพัดที่ระยะ $z/R = 3$ ให้ค่าคุณภาพคำตอบที่สูงกว่าใบพัดที่มีระยะ $z/R = 1$ อย่างชัดเจน ซึ่งตรงกันข้ามกับใบพัด 36 นิ้ว นอกจากนี้ ใบพัด 40 นิ้ว มีประสิทธิภาพการบินลอยตัวที่ดีกว่าใบพัด 36 นิ้ว ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดใบพัดที่ใหญ่กว่า ทำให้สร้างแรงขับได้มากขึ้น



รูปที่ 10 ความเร็วรอบต่อค่าคุณภาพคำตอบ ตามความแตกต่างของระดับความสูง z/R จากการทดสอบ

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย BEMT พบว่า ค่าคุณภาพคำตอบมีค่าค่อนข้างคงที่และเปลี่ยนแปลงน้อยมากตาม RPM ที่เพิ่มขึ้น สำหรับทั้งใบพัดขนาด 40 นิ้ว และ 36 นิ้ว และสำหรับค่า z/R ต่างๆ ที่พิจารณา นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่า ใบพัดขนาด 40 นิ้ว ให้ค่าคุณภาพคำตอบที่สูงกว่าใบพัดขนาด 36 นิ้วเล็กน้อย ในทุกช่วง RPM และทุกค่า z/R ที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 11 ความเร็วรอบต่อค่าคุณภาพคำตอบ ตามความแตกต่างของระดับความสูง z/R โดย BEMT

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง (รูปที่ 10) กับ BEMT (รูปที่ 11) จะเห็นความแตกต่างที่ชัดเจน คือ ในรูปที่ 10 ค่าคุณภาพคำตอบจากการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดตาม RPM โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง RPM ต่ำๆ และอาจเริ่มลดลงหรือคงที่ในช่วง RPM ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ อิทธิพลของผลกระทบจากพื้น หรือค่า z/R ต่อค่าคุณภาพคำตอบในผลการทดลองก็มีความชัดเจนกว่า โดยค่าคุณภาพคำตอบมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อ z/R ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ RPM ต่ำ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างผลจากทั้งสองรูปนี้ คือ ความผันแปรของค่าคุณภาพคำตอบตาม RPM จากการคำนวณด้วย BEMT คาดการณ์ว่าค่าคุณภาพคำตอบจะค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน อิทธิพลของผลกระทบจากพื้น แม้ว่า BEMT จะสามารถจำลองอิทธิพลของ z/R ได้ แต่ผลลัพธ์ในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าคุณภาพคำตอบตาม z/R ที่น้อยกว่าที่พบในการทดลอง ในรูปที่ 10 ความแตกต่างเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อจำกัดของทฤษฎี BEMT ที่อาจไม่สามารถจับปรากฏการณ์การไหลของอากาศที่ หรือการไหลวนอากาศใกล้พื้นดินที่ซับซ้อนได้

6. สรุป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในการเปรียบเทียบสมรรถนะของใบพัดขนาด 40 นิ้ว และ 36 นิ้ว ทั้งจากข้อมูล T-Motor การวิเคราะห์ด้วย BEMT และการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีผลกระทบจากพื้น โดยอ้างอิงทฤษฎีโมเมนตัมสามารถสรุปได้ดังนี้

ใบพัดขนาด 40 นิ้ว แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการบินลอยตัวที่ดีกว่าใบพัดขนาด 36 นิ้ว ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีโมเมนตัม ข้อมูล T-Motor และการวิเคราะห์ด้วย BEMT ที่ระบุว่าใบพัดขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า การทดสอบ และการวิเคราะห์ด้วย BEMT ชี้ให้เห็นว่าผลกระทบจากพื้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของใบพัดได้ แม้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดสอบอาจไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎีโมเมนตัมอย่างสมบูรณ์ ใบพัดแต่ละขนาดจะมีช่วงความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการให้ประสิทธิภาพสูงสุดแตกต่างกัน โดยใบพัด 40 นิ้ว แสดงประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 0.42 ที่ความเร็วรอบประมาณ 2,365 RPM ค่าสมรรถนะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มต่ำกว่าข้อมูลที่ระบุโดยผู้ผลิต (T-Motor) แต่จากผลของ BEMT ค่าคุณภาพค่าตอบไม่ขึ้นอยู่กับ RPM แนวโน้มโดยรวมของความสัมพัทธ์ยังคงสอดคล้องกัน โดยเฉพาะในประเด็นที่ว่าใบพัดขนาดใหญ่กว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่า แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนบางประการ ผลการทดสอบโดยรวมยังคงแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับหลักการของทฤษฎีโมเมนตัมในเรื่องของความสัมพัทธ์ระหว่างขนาดใบพัดกับประสิทธิภาพการบินลอยตัว

7. ข้อเสนอแนะ

หลังจากสรุปผลการวิจัยในด้านสมรรถนะของใบพัด ทั้งกรณีมีผลกระทบจากพื้นและไม่มีผลกระทบจากพื้นนั้น และนำมาเปรียบเทียบทั้งข้อมูลจากการทดสอบและจาก T-Motor โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

ใบพัดควรที่จะเพิ่มจำนวนของกิลบใบพัดเป็น 3 หรือ 4 กิลบใบพัด หรือมีขนาดที่ใกล้เคียงกับที่ทำการทดสอบ เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้นิตของใบพัดที่เหมาะสม เช่น ใบพัดขนาด 30" x 10.5" และ 32" x 11" รวมทั้งใช้ใบพัดชนิดแบบปรับมุมได้ (Variable Pitch Angle) ช่วงการปรับมุมเท่ากับ 0 ถึง 11 องศา โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 องศา จากการทบทวนวรรณกรรมเพื่อเพิ่มข้อเปรียบเทียบในการวิเคราะห์สมรรถนะให้มากขึ้น

มีการทดสอบการรับแรงจากการทดสอบใบพัดเพื่อดูความแข็งแรงของวัสดุและโครงสร้างที่ได้แบบไวทั้งผ่านการจำลองแรงที่เกิดขึ้นอย่างละเอียด

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่านที่ให้ความรู้ในด้านอากาศยานปีกหมุน ดำเนินการเอกสาร และได้ช่วยแก้ปัญหาด้านเทคนิคในการทดสอบงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายขอขอบคุณคณะผู้ดูแลประสานงาน และสนับสนุนเงินทุนวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีงานวิจัยทางวิศวกรรมอากาศยานปีกหมุนต่อไปในอนาคต

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. D. Nathan and R. B. Green, "Measurement of a rotor flow in ground effect and visualization of the brown-out phenomenon," in *64th American Helicopter Society Annual Forum*, 2008.
- [2] T. E. Lee, J. G. Leishman and M. Ramasamy, "Fluid Dynamics of Interacting Blade Tip Vortices with a Ground Plane," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 55, no. 2, April 2010.
- [3] B. E. Lee, Y. S. Byun, J. Kim, and B. S. Kang, "Experimental hover performance evaluation on a small-scale rotor using a rotor test stand," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 6, pp. 1449-1456, June 2011.

- [4] F. Panayotov, I. Dobrew, F. Massouh and M. Todorov, "Experimental study of a helicopter rotor model in hover," *MATEC Web of Conferences*, vol. 234, no. 3, January 2018.
- [5] J. Schmaus, B. Berry, W. Gross, and P. Koliais, "Experimental Study of Rotor Performance in Deep Ground Effect with Application to a Human-Powered Helicopter," *Presented at the American Helicopter Society 68th Annual Forum*, 2012.
- [6] M. Benedict, J. Winslow, Z. Hasnain and I. Chopra, "Experimental Investigation of Micro Air Vehicle Scale Helicopter Rotor in Hover," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 7, no. 3, pp. 231-256, September 2015.
- [7] S. A. Conyers, "Empirical Evaluation of Ground, Ceiling, and Wall Effect for Small-Scale Rotorcraft," M.S. thesis, University of Denver, Denver, 2019.
- [8] M. Wojtas, L. Czajkowski and K. Szumanski, "Ground test stands for testing rotors in insulated conditions," *Transactions on Aerospace Research*, vol. 2021, no. 1, pp. 15–23, March 2021.
- [9] A. Atte, D. Wylie and J. Rauleder, "Experimental Investigation of Multi-Rotor Aerodynamic Interactions," in *The Vertical Flight Society's 78th Annual Forum & Technology Display*, Ft. Worth, Texas, 2022.
- [10] J. G. Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [11] T-Motor official website, "About T-Motor," [Online]. Available: <https://www.tmotor.com/about-us>. (Accessed: May. 6, 2025).
- [12] A. Garofano-Soldado, P. J. Sanchez-Cuevas, G. Heredia and A. Olloero, "Numerical-experimental evaluation and modelling of aerodynamic ground effect for small-scale tilted propellers at low Reynolds numbers," *Aerospace Science and Technology*, vol. 126, pp. 1-17, July 2022.
- [13] C. R. Russell and M. K. Sekula, "Comprehensive Analysis Modeling of Small-Scale UAS Rotors," in *AHS International 73rd Annual Forum*, 2017.
- [14] R. W. Deters and M. S. Selig, "Static testing of micro propellers," in *Proc. 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2008.
- [15] M. P. Merchant, "Propeller Performance Measurement for Low Reynolds Numbers Unmanned Aerial Applications," M.S. Thesis, Wichita State University, Wichita, 2005.

ระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
และคลาวด์คอมพิวติ้ง

Fire Incident Detection System for Housing Estates using IoT
and Cloud Computing Technology

ยุทธจักร อินทร์คง¹, ธงรบ อักษร^{2*}, พงษ์พิณช์ เลิศเจริญวุฒา³, กิตติพงษ์ สุวรรณราช⁴ และ ภาวินี อินทร์ทอง⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

Yuttachak Inkhong¹, Thongrob Auxorn^{2*}, Phongphit Lertjareonwuttha³, Kittipong Suwannaraj⁴
and Pavinee Inthong⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Department of information Technology, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram

Rajabhat University

auxorn@psru.ac.th

Received 28 February 2025

Revised 21 May 2025

Accepted 06 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง เพื่อตรวจจับและแจ้งเตือนเหตุอัคคีภัย ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย เซนเซอร์ตรวจจับควัน อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหว ซึ่งเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับรวบรวมและส่งข้อมูลไปยังระบบคลาวด์คอมพิวติ้งเพื่อวิเคราะห์และประมวลผล แสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน แบบเรียลไทม์ ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถตรวจสอบและแจ้งเตือนเหตุอัคคีภัยได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้มีความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินเพิ่มมากขึ้น สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์ได้ตลอดเวลา มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่ต่ำ การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.70 ระดับดีมาก สามารถนำไปพัฒนาการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพิ่มการแจ้งเตือนผ่าน SMS หรือแอปพลิเคชันบนมือถือ และนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบต่าง ๆ ในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบตรวจสอบ, อัคคีภัย, หมู่บ้านจัดสรร, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, คลาวด์คอมพิวติ้ง

Abstract

This research aims to develop a fire incident detection system for housing estates using IoT and cloud computing technologies. The developed system consists of sensors for detecting smoke, temperature, humidity, and motion, which are connected to a microcontroller to collect data and transmit it to cloud computing for analysis and processing. The results are displayed

through a real-time web application. The results show that the system can accurately detect fire incidents and issue alerts, thus enhancing the safety of life and property. In addition, the system supports continuous device status monitoring and operates at low cost. A user satisfaction evaluation showed an average score of 4.70, indicating a very high level of satisfaction. Moreover, the system can be further enhanced for better efficiency, including integration with SMS alerts or mobile applications, as well as extension to other monitoring purposes in the future.

Keywords: Detection System, Fire Incident, Housing Estates, Internet of Things, Cloud Computing

1. บทนำ

การเกิดอัคคีภัยภายในสิ่งปลูกสร้างเป็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากไฟฟ้าลัดวงจร การจุดธูปเทียน และขั้นตอนในการประกอบอาหาร ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นการเผาไหม้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ติดไฟง่าย ทำให้ไฟลุกลามเร็วและยากต่อการควบคุม โดยเฉพาะในสถานที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูง เช่น อาคารสูงและหมู่บ้านจัดสรร [1] จากข้อมูลของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (ปภ.) กระทรวงมหาดไทย พบว่าในปี 2566 มีเหตุเพลิงไหม้ในประเทศไทยจำนวนมาก ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในที่อยู่อาศัย ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะในหมู่บ้านจัดสรรที่มีลักษณะบ้านพักอาศัยแบบติดกัน ซึ่งเสี่ยงต่อการลุกลามของไฟได้ง่าย [2] ขณะเดียวกัน รายงานจาก National Fire Protection Association (NFPA) ในสหรัฐอเมริกา ระบุว่าบ้านพักอาศัยยังคงเป็นแหล่งเกิดเหตุเพลิงไหม้สูงสุด โดยผู้เสียชีวิตจากเพลิงไหม้ในปี 2021 เกิดจากเหตุการณ์ในบ้าน [3] ข้อมูลเหล่านี้สะท้อนถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบตรวจจับและแจ้งเตือนเหตุเพลิงไหม้ที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่อยู่อาศัย เพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

แม้จะมีการติดตั้งระบบตรวจจับอัคคีภัยในบางหมู่บ้านจัดสรรแล้ว แต่ระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การพึ่งพาการตรวจสอบด้วยมนุษย์ การแจ้งเตือนที่ล่าช้า การไม่มีระบบบันทึกข้อมูลย้อนหลัง และการขาดการวิเคราะห์สถานะอัตโนมัติ ส่งผลให้เมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้จริง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักรุนแรงมากกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ ระบบเดิมส่วนใหญ่ไม่สามารถส่งข้อมูลแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานหลายจุดในเวลาจริง (real-time) หรือไม่สามารถตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องได้

จากการศึกษาระบบตรวจจับอัคคีภัยที่ผ่านมา พบว่าแม้จะมีการพัฒนาโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันหรือกล้องวงจรปิดร่วมกับระบบแจ้งเตือน แต่ยังไม่มีการผสมผสานการทำงานของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เข้ากับระบบประมวลผลข้อมูลบนคลาวด์คอมพิวติ้ง (Cloud Computing) อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อรองรับการเก็บข้อมูลวิเคราะห์แนวโน้ม และแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ได้ในระดับครัวเรือนอย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังมีต้นทุนในการพัฒนาระบบเพื่อนำมาใช้งาน ที่ต่ำกว่าการใช้ระบบที่มีในปัจจุบัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ซึ่งสามารถตรวจจับข้อมูลจากเซนเซอร์หลายประเภท เช่น ควัน อุณหภูมิ และความเคลื่อนไหว มารวมเข้ากับระบบ คลาวด์คอมพิวติ้ง ที่สามารถประมวลผลและแสดงผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ต่อเนื่อง และมีความแม่นยำ พร้อมทั้งสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้แบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายจากเหตุอัคคีภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยจะมุ่งเน้นความแม่นยำในการตรวจจับเหตุการณ์ ความเร็วในการแจ้งเตือน ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน รวมไปถึงแสดงถึงข้อจำกัดของระบบที่พัฒนา

2. ขอบเขตงานวิจัย

- 2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ ใช้เซนเซอร์ตรวจจับควัน อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหว ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อรวบรวมและประมวลผลข้อมูล
- 2.2 บริการคลาวด์คอมพิวเตอร์ ใช้ในการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์
- 2.3 การแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ข้อมูลจากระบบจะถูกนำเสนอผ่านเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของพื้นที่ได้แบบเรียลไทม์
- 2.4 กำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างของหมู่บ้านจัดสรรจำนวน 32 หลังคาเรือน โดยสุ่มเลือกประชากรที่เป็นเจ้าของบ้านและเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย รวมทั้งหมด 30 คน เพื่อทดสอบและประเมินผลการทำงาน

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 ระบบการตรวจสอบ (Monitoring System) เป็นแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการเฝ้าระวัง วิเคราะห์ และแจ้งเตือนเกี่ยวกับสภาวะหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะเกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน [4] ในสถานการณ์ฉุกเฉินอย่างอัศจรรย์ ระบบที่ดีควรสามารถดำเนินการในเชิงป้องกัน (Preventive) ได้ ไม่ใช่เพียงแจ้งเตือน (Reactive) เท่านั้น ซึ่งการทำงานของระบบตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพควรมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ การเก็บข้อมูล (Data Acquisition) การประมวลผลและวิเคราะห์ (Data Analysis) และการแจ้งเตือนหรือรายงานผล (Notification/reporting) โดยต้องทำงานแบบอัตโนมัติและทันเวลา เพื่อให้สามารถระงับเหตุได้ก่อนที่จะลุกลามเป็นวิกฤติ

3.1.2 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things : IoT) เป็นแนวคิดที่อุปกรณ์และวัตถุสามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้โดยอัตโนมัติ โดยอาศัยเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย ช่วยให้ อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อและสื่อสารกันผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต [5] ตัวอย่างเช่น การนำไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับ อุณหภูมิ ควัน และความเคลื่อนไหว เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลร่วมกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุเหตุการณ์

3.1.3 คลาวด์คอมพิวเตอร์ (Cloud Computing) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้สามารถประมวลผลและจัดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ภายในพื้นที่ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการดำเนินงาน ในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างแบบ IaaS ผ่าน Amazon EC2 [6] ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถขยายการประมวลผลตามปริมาณข้อมูลได้อย่างยืดหยุ่น อีกทั้งยังรองรับการแสดงผลข้อมูลผ่านเว็บในรูปแบบเรียลไทม์ และเก็บข้อมูลย้อนหลังเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความเสี่ยงในอนาคต

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 เครื่องตรวจจับควันและแจ้งเตือนเหตุการณ์ไฟไหม้ผ่าน LINE Notify ของ กุลธิดา ดีเม็ด และคณะ [7] ได้พัฒนาระบบใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันและอุณหภูมิ พร้อมเสียงแจ้งเตือนและกล้องเว็บแคมถ่ายภาพพื้นที่ติดตั้งแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify เพื่อจัดการเหตุไฟไหม้ได้รวดเร็ว

3.2.2 การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ NMU-AQI สำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารแบบเวลาจริงของ พงศธร ชมดี [8] ได้พัฒนาระบบโดยมีแนวคิดใช้อุปกรณ์ NMU-AQI ที่ตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ ส่งข้อมูลทุก 1 ชั่วโมงไปยังเซิร์ฟเวอร์และแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในอาคารได้อย่างถูกต้อง รองรับอุปกรณ์ได้หลายตัว

3.2.3 ระบบแจ้งเตือนอัคคีภัยโดยใช้ภาพถ่ายความร้อนและภาพเหตุการณ์จริงแบบประหยัด ของ วุฒิชัย พรพัชรพงศ์และภัทราวัลย์ คำปลิว [9] ได้พัฒนาระบบโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับควัน และก๊าซร่วมกับภาพถ่าย แจ้งเตือน เชื่อมต่อผ่าน WiFi ไปยัง Line Notify เพื่อเฝ้าระวังและตรวจจับสัญญาณที่อาจบ่งบอกถึงการเกิดอัคคีภัย

3.2.4 ชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สายโดยมีแนวคิดใช้อุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สาย ของ พศวีร์ ศรีโหมด และคณะ [10] ได้พัฒนาระบบโดยการใช้อุปกรณ์หลายชุด แต่ละชุดทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูลควันและความร้อนจากหลายจุด ส่งข้อมูลในรูปแบบไร้สายเชื่อมต่อผ่าน WiFi โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกรวบรวมที่ตัวรับข้อมูล เพื่อส่งสัญญาณเตือนด้วยหลอดไฟ และจอแสดงผล

3.2.5 ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอัคคีภัยของกองทัพเรือ จิตติ สัมภักตตะกุล และพีระพงษ์ พรหมจันทร์ [11] ใช้ Smoke Detector และ Fire Alarm ส่งข้อมูลผ่าน WiFi แสดงผลผ่านเว็บไซต์ฟเวออร์ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการป้องกันไฟไหม้ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์มายังส่วนแสดงผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเห็นภาพรวมและวิเคราะห์สถานการณ์ได้ง่าย

3.2.6 ระบบแจ้งเตือนผู้บุกรุกด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหวอินฟราเรดแบบพาสซีฟบนพื้นฐานของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ของ อรรถพล อมาตย์กุล [12] ใช้เซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวอินฟราเรดแบบพาสซีฟ (PIR) ในการตรวจจับผู้บุกรุก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในระบบรักษาความปลอดภัยภายในบ้าน

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ายังมีข้อจำกัดที่สำคัญในระบบตรวจจับอัคคีภัยแบบเดิมหลายประการ โดยเฉพาะในงานของ กุลธิดา ดีเม็ด และคณะ [7] พงศธร ชมดี [8] พศวีร์ ศรีโหมด และคณะ [10] ที่ใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันและอุณหภูมิร่วมกับการแจ้งเตือน พบว่าแม้ระบบสามารถแจ้งเตือนได้รวดเร็ว แต่ยังขาดการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังและไม่สามารถติดตามสถานะอุปกรณ์แบบเรียลไทม์ได้ งานของ วุฒิชัย พรพัชรพงศ์ และภัทราวัลย์ คำปลิว [9] ใช้ภาพถ่ายความร้อนร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับควัน ซึ่งให้ความแม่นยำสูงขึ้น แต่ยังจำกัดเฉพาะจุดติดตั้งและไม่สามารถตรวจสอบหลายพื้นที่พร้อมกันได้ ในขณะที่งานของ จิตติ สัมภักตตะกุล และพีระพงษ์ พรหมจันทร์ [11] พัฒนาระบบแจ้งเตือนอัคคีภัยของกองทัพเรือ โดยใช้ Smoke Detector และ Fire Alarm ส่งข้อมูลผ่าน WiFi และแสดงผลผ่านเว็บไซต์ฟเวออร์ แต่ยังไม่มีการใช้เทคโนโลยีคลาวด์ เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลหรือจัดเก็บข้อมูลย้อนหลังอย่างเป็นระบบ อีกทั้งหากมีการนำเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวในงานวิจัยของ อรรถพล อมาตย์กุล [12] จะทำให้สามารถระบุถึงสิ่งที่มีชีวิต เพื่อให้ความช่วยเหลือได้อย่างรวดเร็ว ลดความสูญเสีย ดังนั้น แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีตรวจจับอัคคีภัยโดยอาศัยเซนเซอร์และระบบประมวลผลต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ยังไม่พบการบูรณาการเซนเซอร์หลายประเภทเข้ากับระบบประมวลผลบนคลาวด์แบบเรียลไทม์ รวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์แนวโน้ม การตรวจสอบย้อนหลัง และการแสดงผลข้อมูลผ่านแพลตฟอร์มที่เข้าถึงได้สะดวก เช่น เว็บแอปพลิเคชัน อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบการมีอยู่ของบุคคลหรือสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

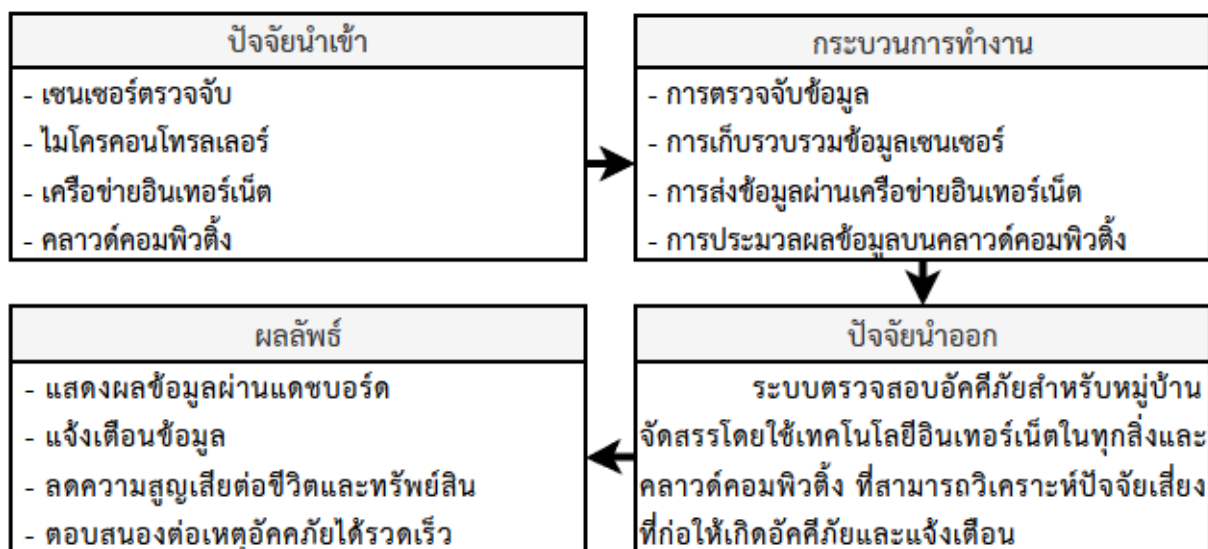
4. การดำเนินการวิจัย

การพัฒนาระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง ใช้แนวทางการดำเนินการวิจัยตามกระบวนการ Software Development Life Cycle เพื่อให้การพัฒนา มีโครงสร้างที่ชัดเจนและสามารถปรับปรุงต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับหมู่บ้านจัดสรรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหลักการสำคัญ 6 ขั้นตอน ดังนี้

4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความต้องการ (Requirement Analysis)

ศึกษาความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดอัคคีภัยในหมู่บ้านจัดสรร วิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น เจ้าของบ้าน ผู้ดูแลหมู่บ้าน ยามรักษาความปลอดภัยของหมู่บ้าน หน่วยดับเพลิง จากแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ ผู้วิจัยมีแนวคิดนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ที่ประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 เป็นชิป

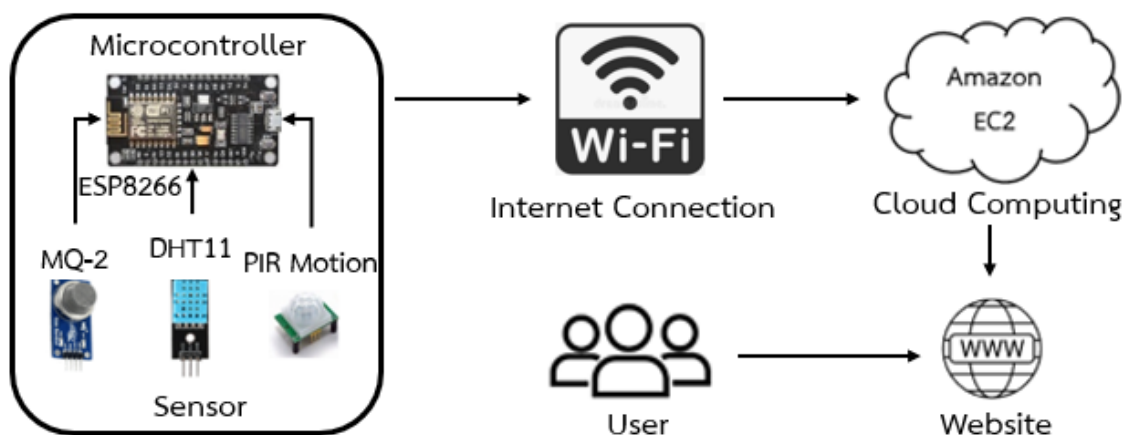
ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มาพร้อม WiFi ในตัว รองรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาหลากหลาย เช่น เซอร์ตรวจจับควัน (MQ-2 Smoke Gas Sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับแก๊ส มีเทน แอลพีจี ควันท่อ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ฯลฯ เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้น (DHT11 Temperature and Humidity Sensor) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ (0-50°C) และความชื้น (20-90% RH) มีความแม่นยำสูงและตอบสนองรวดเร็ว เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (PIR Motion Sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์หรือสัตว์ด้วยอินฟราเรด อุปกรณ์ทั้งหมดจะทำงานร่วมกันเพื่อทำหน้าที่ตรวจสอบข้อมูลและส่งไปยังเทคโนโลยีคลาวด์คอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่บันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลที่ติดตั้งไว้ และนำข้อมูลไปประมวลผลข้อมูลเพื่อตรวจสอบหาความผิดปกติ การทำงานของระบบใช้เครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายไร้สาย เพื่อทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน มีการแสดงผลการตรวจสอบผ่านเว็บแอปพลิเคชัน หากมีเหตุการณ์ที่ผิดปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงสีของไอคอนหรือสัญลักษณ์ในหน้าของเว็บเพจ และส่งสัญญาณเสียงเพื่อแจ้งเตือน ทั้งนี้ในการเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับ เช่น เซนเซอร์ควัน MQ-2 และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT11 คณะวิจัยได้พิจารณาให้มีคุณสมบัติสอดคล้องกับมาตรฐานอุปกรณ์แจ้งเตือนไฟไหม้ เช่น มาตรฐาน NFPA 72 (National Fire Alarm and Signaling Code) ที่ระบุถึงแนวทางการออกแบบและติดตั้งระบบแจ้งเตือนไฟไหม้ และมาตรฐาน UL 268 สำหรับเครื่องตรวจจับควัน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยในการใช้งานจริง โดยเฉพาะในพื้นที่อยู่อาศัยที่มีความเสี่ยงจากอัคคีภัยสูง อุปกรณ์ที่เลือกใช้แม้จะมีต้นทุนต่ำแต่ยังคงสามารถปรับใช้งานให้มีประสิทธิภาพตามแนวทางของมาตรฐานสากลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

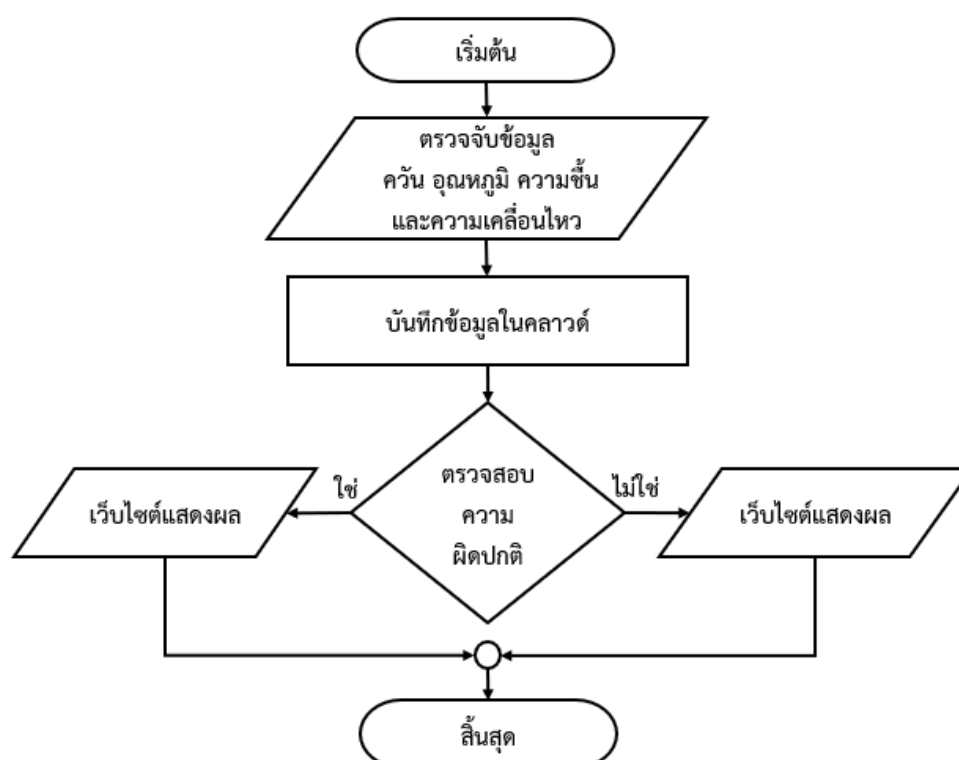
4.2 การออกแบบระบบ (System Design)

4.2.1 การออกแบบระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยส่วนทำงานหลักดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง การตรวจสอบข้อมูลประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ตรวจจับควัน เซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ และเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว ส่วนที่สอง การจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูล ซึ่งใช้ระบบคลาวด์คอมพิวเตอร์ Amazon Elastic Compute Cloud ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Ubuntu Server เว็บเซิร์ฟเวอร์ Apache โปรแกรมภาษา PHP และระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL Server ส่วนที่สาม การแสดงผลการวิเคราะห์และแจ้งเตือนผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

4.2.2 ขั้นตอนการทำงานระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวเตอร์ แสดงกระบวนการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการทำงาน ดังรูปที่ 3 แผนผังการทำงานของระบบ ระบบเริ่มต้นด้วยการตรวจจับข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับควัน อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหว โดยส่งข้อมูลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังคลาวด์คอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลและจัดเก็บลงฐานข้อมูล จากนั้นระบบจะแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บไซต์ พร้อมส่งสัญญาณเตือนเมื่อพบความผิดปกติ และวนลูปการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

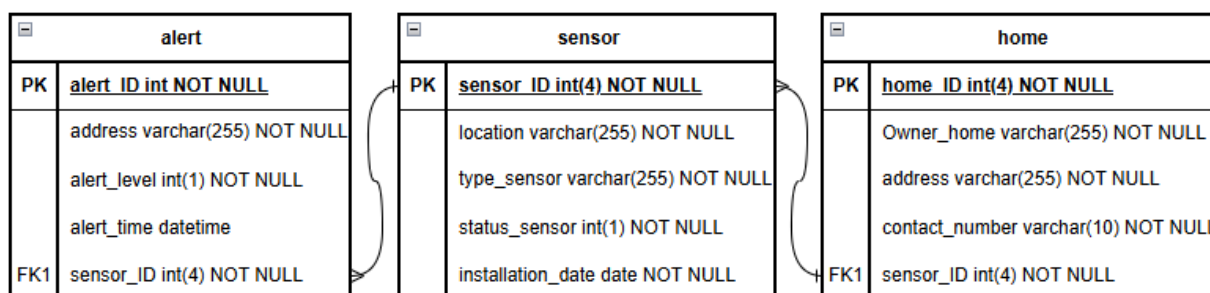


รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของระบบ

4.3 การพัฒนาและการติดตั้งระบบ (Implementation & Development)

4.3.1 ติดตั้งซอฟต์แวร์บนคลาวด์คอมพิวเตอร์

4.3.2 ออกแบบฐานข้อมูลบนคลาวด์คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4 แสดงแผนผังข้อมูลแบบสัมพันธ์ของฐานข้อมูลที่ประกอบไปด้วย ตารางข้อมูล Alert ตารางข้อมูล Sensor และ ตารางข้อมูล Home มีรายการข้อมูลภายในตารางข้อมูล ดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 แผนผังข้อมูลแบบสัมพันธ์ของฐานข้อมูล

ตารางที่ 1 รายการข้อมูลในตารางข้อมูล

ตารางข้อมูล Alert		
PK	alert_ID	ลำดับหมายเลขของการแจ้งเตือน
	address	บ้านที่ติดตั้ง
	alert_level	สถานะของการแจ้งเตือน
	alert_time	
FK	sensor_ID	หมายเลขของเซนเซอร์
ตารางข้อมูล Sensor		
PK	sensor_ID	ลำดับหมายเลขของเซนเซอร์
	location	สถานที่ติดตั้ง เช่น ห้องนอน ห้องนั่งเล่น ห้องครัว
	type_sensor	ชนิดของเซนเซอร์
	status_sensor	สถานะของเซนเซอร์
	value_sensor	ค่าที่ตรวจจับ
	Insatallation_date	วันที่ติดตั้งเซนเซอร์
ตารางข้อมูล Home		
PK	home_ID	ลำดับหมายเลขของบ้าน
	Owner_home	ชื่อเจ้าของบ้าน
	address	บ้านที่ติดตั้ง
	contact_number	เบอร์ติดต่อ
FK	sensor_ID	หมายเลขของเซนเซอร์

4.3.3 การเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเชื่อมต่อเซนเซอร์และส่งข้อมูลไปยังคลาวด์คอมพิวเตอร์

4.3.4 การเขียนโปรแกรมส่งข้อมูลระหว่างอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งกับคลาวด์คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5

4.3.5 การพัฒนาเว็บแดชบอร์ดสำหรับแสดงผลข้อมูล

```

void sendDataToServer(const String& temperature, const String& smoke, const String& motionStatus) {
    if(WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http; http.begin(wifiClient, serverName);
        http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");
        String httpRequestData = "address =" + home_number + "&location =" + location +
                                "&temperature =" + temperature + "&smoke =" + smoke +
                                "&motion =" + motionStatus;
        int httpResponseCode = http.POST(httpRequestData);
        handleServerResponse (httpResponseCode, http);
        http.end();}}

```

รูปที่ 5 ตัวอย่างซอร์สโค้ดคำสั่งการส่งข้อมูลของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งกับคลาวด์คอมพิวเตอร์

4.4 การทดสอบระบบ (Testing)

4.4.1 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ โมดูลสื่อสาร และการทำงานของคลาวด์คอมพิวเตอร์

4.4.2 ทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพ ระยะเวลาการแจ้งเตือน การใช้พลังงาน และความเสถียรของระบบ

4.4.3 ทดสอบภาคสนาม ติดตั้งระบบจริงในหมู่บ้านจัดสรรและสังเกตการทำงานภายใต้สถานการณ์จำลอง

4.4.4 การเลือกสุ่มกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้คือผู้พักอาศัยและเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยในหมู่บ้านจัดสรรแห่งหนึ่ง จำนวน 30 คน จากจำนวนประชากรทั้งหมด 32 หลังคาเรือน โดยคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างจากสูตรของ ทาโร ยามาเน [13] ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งได้จำนวนที่เหมาะสมกับประชากรกลุ่มเป้าหมาย การเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จากรายชื่อผู้อยู่อาศัยและเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแทนประชากรอย่างเหมาะสม และลดอคติที่อาจเกิดขึ้นในการคัดเลือก

4.5 การนำไปใช้งาน (Deployment)

4.5.1 ติดตั้งระบบในหมู่บ้านจัดสรรที่เป็นพื้นที่ทดสอบ

4.5.2 อบรมผู้ใช้งานเกี่ยวกับวิธีการใช้งานระบบและการตอบสนองเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน

4.5.3 ให้บริการสนับสนุนทางเทคนิคและการดูแลระบบ

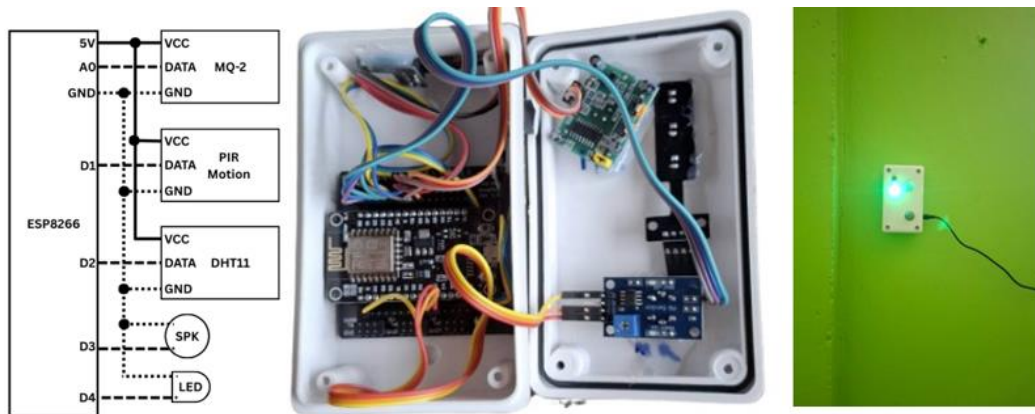
4.5.4 แบบสอบถามความพึงพอใจต่อระบบ คณะวิจัยเลือกใช้เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือแบบสอบถามความพึงพอใจต่อระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวเตอร์ ซึ่งผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน และมีการทดสอบหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability Test) ของแบบสอบถามโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) ซึ่งได้ค่าความเชื่อมั่นอยู่ที่ 0.82 แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ในระดับดี

4.6 การบำรุงรักษาและปรับปรุงระบบ (Maintenance & Enhancement)

- 4.6.1 ตรวจสอบและแก้ไขปัญหา
- 4.6.2 วิเคราะห์ข้อมูลจากระบบเพื่อนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพ
- 4.6.3 พัฒนาเวอร์ชันใหม่ของระบบเพื่อรองรับอุปกรณ์ที่ทันสมัยขึ้นและเพิ่มฟีเจอร์ใหม่

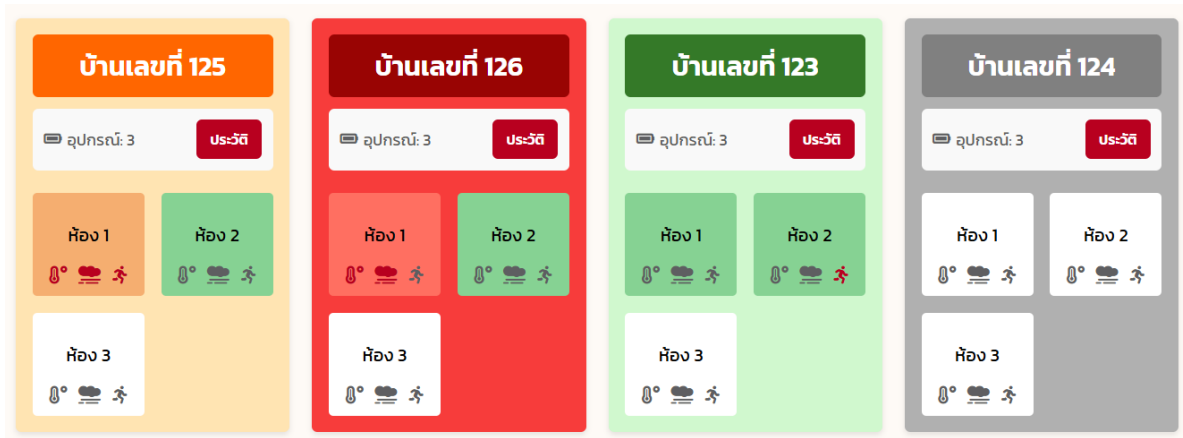
5. ผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวเตอร์ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งการตรวจสอบข้อมูล และส่วนที่สองการแสดงผลข้อมูล



รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบข้อมูล

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบข้อมูล ดังรูปที่ 6 ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับควัน อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหว ในการทำงานของส่วนตรวจสอบข้อมูลจะทำหน้าที่ตรวจจับข้อมูลจากเซนเซอร์ และส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้ ไปบันทึกลงในฐานข้อมูลบนคลาวด์คอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ถูกบันทึกในฐานข้อมูล จะถูกนำไปวิเคราะห์และประมวลผล เพื่อพิจารณาถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้น ๆ ว่า ปกติ หรือผิดปกติ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปแสดงผลต่อไป



รูปที่ 7 แสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชัน

การแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชัน ดังรูปที่ 7 เป็นการแสดงสถานะของห้องต่าง ๆ ภายในบ้านที่ติดตั้งระบบ โดยใช้สีและสัญลักษณ์เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจและติดตามสถานการณ์ต่างๆ แถบสีแสดงเป็น สีเขียว สีส้ม หรือสีแดง หมายถึงบ้านนี้ได้รับการตรวจสอบ โดยสีเขียวมีความหมายว่าสถานะปกติ สีส้มมีความหมายว่ามีความเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย สีแดงคือเกิดอัคคีภัย โดยในส่วนของสีส้มกับสีแดงนั้น คณะวิจัยนำข้อมูลของความเคลื่อนไหวเข้ามาพิจารณา หากการตรวจสอบพบความผิดปกติแต่มีการเคลื่อนไหวจะแสดงเป็นสีส้ม ในขณะที่การตรวจสอบพบความผิดปกติและไม่พบการเคลื่อนไหวจะแสดงเป็นสีแดง และสุดท้ายหากมีสีเทาแสดงว่าไม่มีการตรวจสอบหรือระบบมีปัญหา ในส่วนของสัญลักษณ์ อุณหภูมิ ควัน และการเคลื่อนไหวนั้น หากมีสีตัวแสดงว่าตรวจสอบไม่พบความผิดปกติหรือไม่มีการเคลื่อนไหว และในทางกลับกันถ้าเป็นสีแดง แสดงว่าตรวจสอบพบความผิดปกติหรือมีการเคลื่อนไหว

ตารางที่ 2 การทดสอบในส่วนของอุปกรณ์

ครั้งที่	ควัน	อุณหภูมิ	เคลื่อนไหว	แจ้งเตือน	สี	สถานการณ์จำลอง
1	พบ	ไม่พบ	พบ	แจ้งเตือน	สีส้ม	จุดธูปภายในห้อง
2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	แจ้งเตือน	สีแดง	จุดธูปภายในห้อง
3	พบ	พบ	พบ	แจ้งเตือน	สีส้ม	เผากระดาษภายในห้อง
4	พบ	พบ	ไม่พบ	แจ้งเตือน	สีแดง	เผากระดาษภายในห้อง
5	ไม่พบ	พบ	พบ	แจ้งเตือน	สีส้ม	ต้มน้ำในหม้อไฟฟ้าภายในห้อง
6	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	แจ้งเตือน	สีแดง	ต้มน้ำในหม้อไฟฟ้าภายในห้อง
7	ไม่พบ	พบ	พบ	แจ้งเตือน	สีส้ม	เป่าลมร้อนจากไดร์เป่าผมใส่อุปกรณ์
8	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	แจ้งเตือน	สีแดง	เป่าลมร้อนจากไดร์เป่าผมใส่อุปกรณ์
9	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	แจ้งเตือน	สีเขียว	ไม่มีเหตุการณ์
10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	แจ้งเตือน	สีเขียว	ไม่มีเหตุการณ์

การทดสอบโดยการจำลองสถานการณ์ที่หลากหลายที่อาจส่งผลต่อการตรวจสอบ โดยติดตั้งอุปกรณ์ในระยะไม่เกิน 5 เมตร ภายในห้องขนาด 9 ตารางเมตร จากผลการทดสอบระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง ดังตารางที่ 2 พบว่าสามารถตรวจจับความร้อนและควันได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถตรวจจับควันที่เกิดจากไอน้ำได้ ผลลัพธ์นี้แสดงถึงข้อจำกัดของเซนเซอร์ ในการแยกแยะควันที่มีลักษณะเป็นไอน้ำและควันที่เกิดจากการเผาไหม้

ตารางที่ 3 ผลการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อการใช้งานระบบ

รายการ	$\bar{x}$	SD	ผลการประเมิน
ด้านการแสดงผล			
การแสดงผลในรูปแบบที่เหมาะสมกับหน้าจอ	4.60	0.49	ดีมาก
การแสดงผลที่เข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน	4.70	0.46	ดีมาก
ความสะดวกในการดูข้อมูลที่แสดงผลตามสถานการณ์	4.80	0.40	ดีมาก
ความสามารถในการแสดงผลข้อมูลจากหลายแหล่งที่มา	4.80	0.40	ดีมาก
ด้านการใช้งาน			
ความสะดวกในการดูข้อมูลย้อนหลัง	4.67	0.54	ดีมาก
ความสะดวกในการดูสถานะระบบออนไลน์	4.70	0.46	ดีมาก
ความชัดเจนของสัญลักษณ์หรือการแสดงผลสถานะ	4.60	0.49	ดีมาก
ด้านการแจ้งเตือน			
ประสิทธิภาพของการแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ	4.63	0.55	ดีมาก
ความชัดเจนในการแสดงผลเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ	4.70	0.46	ดีมาก
ความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลสำคัญเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติ	4.77	0.42	ดีมาก
เฉลี่ยรวม	4.70	0.47	ดีมาก

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง ดังตารางที่ 3 แบ่งเป็น 3 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านการแสดงผล มีค่าเฉลี่ยรวม 4.73 อยู่ในระดับดีมาก ด้านการใช้งาน มีค่าเฉลี่ยรวม 4.66 อยู่ในระดับดีมาก ด้านการแจ้งเตือน มีค่าเฉลี่ยรวม 4.70 อยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยทุกด้านรวม 4.70 อยู่ในระดับดีมาก โดยค่าคะแนนมากที่สุดในเรื่องความสะดวกในการดูข้อมูลที่แสดงผลตามสถานการณ์ และความสามารถในการแสดงผลข้อมูลจากหลายแหล่งที่มา มีค่าเฉลี่ยที่ 4.80 ค่าคะแนนต่ำสุดในเรื่องการแสดงผลในรูปแบบที่เหมาะสมกับหน้าจอ และความชัดเจนของสัญลักษณ์หรือการแสดงผลสถานะ มีค่าเฉลี่ยที่ 4.60

การทดสอบความแตกต่างของความพึงพอใจระหว่างกลุ่มผู้ใช้งาน ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Independent Samples t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความพึงพอใจระหว่าง กลุ่มเจ้าของบ้าน (n=25) และ เจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย (n=5) ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระดับความพึงพอใจระหว่างกลุ่มผู้ใช้งานโดยใช้การวิเคราะห์ t-test พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งในด้านการแสดงผล ด้านการแจ้งเตือน และด้านการใช้งาน

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความพึงพอใจระหว่างกลุ่ม

รายการ	t-statistic	p-value	ผลการแปลความหมาย
ด้านการแสดงผล	2.03	0.052	ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ด้านการใช้งาน	1.85	0.075	ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ด้านการแจ้งเตือน	1.85	0.074	ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ด้านการแสดงผล ด้านการใช้งาน และด้านการแจ้งเตือน

ความสัมพันธ์	r	p-value	ผลการแปลความหมาย
การแสดงผลกับการใช้งาน	0.960	0.001	ความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก
การใช้งานกับการแจ้งเตือน	0.923	0.001	ความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก
การแจ้งเตือนกับการแสดงผล	0.874	0.001	ความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของความพึงพอใจ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างทุกคู่ของตัวแปร ได้แก่ ด้านการแจ้งเตือนกับด้านการแสดงผล ($r = 0.87, p < 0.001$), ด้านการใช้งานกับด้านการแจ้งเตือน ($r = 0.92, p < 0.001$) และด้านการแสดงผลกับด้านการใช้งาน ($r = 0.96, p < 0.001$) สะท้อนให้เห็นว่า ความพึงพอใจในด้านใดด้านหนึ่งของระบบมีอิทธิพลต่อการรับรู้เชิงบวกในด้านอื่น ๆ ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสามารถในการใช้งานของระบบส่งผลต่อภาพรวมของความพึงพอใจในระบบอย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาแบบตรวจสอบอัคคีภัยสำหรับหมู่บ้านจัดสรรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวติ้ง พบว่าระบบสามารถวิเคราะห์ข้อมูลสภาพแวดล้อมโดยใช้การตรวจจับจากควัน อุณหภูมิ และความ

เคลื่อนไหว และบันทึกข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูลทั้งในกรณีปกติและผิดปกติ แสดงผลในรูปของเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างถูกต้อง สามารถรับรู้ข้อมูลความเสี่ยงการเกิดอัคคีภัย และจุดเกิดเหตุได้ทันที โดยการทดลองนำไปใช้กับผู้ใช้งานจำนวน 30 คน ผลสำรวจการใช้งานของผู้ใช้ที่มีต่อระบบ มีคะแนนเฉลี่ยความพึงพอใจอยู่ที่ 4.70 อยู่ในระดับดีมาก แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์ได้ตลอดเวลา มีต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่ต่ำ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ พยากรณ์เหตุการณ์ต่าง ๆ จากข้อมูลที่บันทึกไว้ในระบบฐานข้อมูลได้อย่างไร้ตามระบบยังมีข้อจำกัดของเซนเซอร์ ในการตรวจจับควันที่มีปริมาณน้อยมาก ขอบเขตพื้นที่ในการตรวจจับที่จำกัด และไม่สามารถตรวจสอบกลุ่มควันที่เกิดจากไอน้ำได้

การทดลองในสถานการณ์จำลองอัคคีภัยที่หลากหลาย เพื่อเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ จากการทดสอบในสถานการณ์จำลอง 10 ครั้ง (ตามตารางที่ 2) พบว่าเซนเซอร์สามารถตรวจจับเหตุอัคคีภัยได้ถูกต้องใน 8 ครั้ง (Accuracy 80%) โดยมี False Negative จำนวน 2 ครั้ง ซึ่งเกิดจากการไม่สามารถแยกแยะไอน้ำจากควันไฟได้ ทั้งนี้ ความไวในการตรวจจับของระบบอยู่ที่ 83.3% และค่าเฉลี่ยของเวลาตอบสนองจากการตรวจจับถึงการแสดงผลอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 1 นาที ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์จริงยังสามารถแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาการสูญเสียได้ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการใช้งานจริง และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นในอนาคต เช่น การใช้เซนเซอร์ที่สามารถจำแนกชนิดของควันได้

ปัจจุบันระบบตรวจจับเหตุเพลิงไหม้ในท้องตลาดจำนวนมากอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับแบบพื้นฐาน เช่น เซนเซอร์ตรวจจับควัน หรือ เซนเซอร์ตรวจจับความร้อน ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบการแจ้งเตือน โดยไม่มีการจัดเก็บข้อมูลย้อนหลัง ไม่มีระบบวิเคราะห์แนวโน้มเหตุการณ์ และไม่สามารถแสดงผลหรือแจ้งเตือนในแบบเรียลไทม์ผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่หรือเว็บไซต์ ในขณะที่ระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับคลาวด์คอมพิวติ้ง (Cloud Computing) ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในด้าน 1) ความสามารถในการตรวจจับข้อมูลจากหลายเซนเซอร์พร้อมกัน (ควัน อุณหภูมิ ความชื้น และการเคลื่อนไหว) ทำให้สามารถวิเคราะห์เหตุการณ์ได้แม่นยำขึ้น 2) การแจ้งเตือนแบบ เรียลไทม์ ผ่านระบบออนไลน์ ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการตอบสนอง 3) ระบบสามารถ จัดเก็บข้อมูลย้อนหลัง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงหรือปรับปรุงระบบ 4) มีต้นทุนการติดตั้งที่ต่ำกว่าระบบเชิงพาณิชย์หลายระบบ เนื่องจากใช้ฮาร์ดแวร์แบบ open source เช่น ESP8266 และเซนเซอร์ราคาประหยัด จากข้อได้เปรียบข้างต้น ทำให้ระบบที่พัฒนานี้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในระดับครัวเรือนหรือชุมชนที่ต้องการระบบแจ้งเตือนอัคคีภัยที่ทั้งมีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ

ข้อจำกัดของงานวิจัย การทดลองระบบในงานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจำลองภายในหมู่บ้านจัดสรรเพียงแห่งเดียว และภายในห้องที่มีขนาดจำกัด ประมาณ 9 ตารางเมตร จึงอาจไม่สะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือพื้นที่เปิดโล่ง อีกทั้ง จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบระบบมีเพียง 30 คน ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการสรุปแนวโน้มการใช้งานในระดับประชากรทั่วไป โดยเฉพาะกลุ่มผู้ใช้งานที่มีความหลากหลายด้านอายุ อาชีพ หรือประสบการณ์ทางเทคโนโลยี และการประเมินระบบยังไม่ได้ดำเนินการในสถานการณ์ฉุกเฉินจริง ดังนั้นผลการประเมินอาจยังไม่สะท้อนประสิทธิภาพของระบบในสถานการณ์ที่มีแรงกดดันหรือปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ที่ไม่สามารถจำลองได้ในการทดลอง

7. ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นในด้านการตรวจสอบ โดยเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีความไวสูงในการตรวจจับ ครอบคลุมพื้นที่กว้างมากขึ้น เพิ่มการตรวจสอบชนิดอื่น ๆ ที่เป็นปัจจัยเสี่ยงที่ก่อให้เกิดเหตุการณ์ที่ผิดปกติ การแจ้งเตือนผ่าน SMS หรือแอปพลิเคชันบนมือถือ และนำไปประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบต่าง ๆ ในอนาคต

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ได้มอบความรู้ แนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการพัฒนา ทดลองและทดสอบระบบ

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] เชิดศิริ นิลผาย, ฌาน ปัทมะ พลอย, ชนพร พลตงนอก และ อารยา คำช่วย, “การประเมินความเสี่ยงและความพร้อมในการป้องกันและระงับอัคคีภัยของประชาชน ชุมชนบางไส้ไก่ เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร,” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 12-20, มกราคม-มิถุนายน 2567.
- [2] ศูนย์ข้อมูลสาธารณภัย, “สถิติสาธารณภัย ปี 2566,” [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ: <https://datacenter.disaster.go.th/datacenter/cms/8670?id=108628> (เข้าถึงเมื่อ: 30 มีนาคม 2568).
- [3] NFPA, “Home Structure Fires.” [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/home-structure-fires> (Accessed: March. 30, 2025).
- [4] นรินทร์ พนาवास, “การพัฒนาระบบเฝ้าระวังความปลอดภัยห้องดาต้าเซ็นเตอร์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง,” *วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 61-76, มกราคม - เมษายน 2567.
- [5] เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์, สิริวิทย์ ตันตรา และ ภูมิพัฒน์ จบกมลศึก, “ระบบแจ้งเตือนแสดงผลสภาพอากาศสำหรับการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ โดยใช้ IoT,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 94-106, มกราคม - มิถุนายน 2568.
- [6] A. Choudhary, P. K. Verma, and P. Rai, “A walkthrough of amazon elastic compute cloud (Amazon EC2): a review,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 9, no. 11, pp. 93-97, November 2021.
- [7] กุลธิดา ดีเม็ด, ศิริณภา บัวเก่า, ธนพงศ์ นิตยประภา และ ธงรบ อักษร, “เครื่องตรวจจับและแจ้งเตือนเหตุการณ์ไฟไหม้ Line Notify,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 87-97, พฤษภาคม - สิงหาคม 2566.
- [8] P. Chomdee, “Development of Prototype NMU-AQI Device for Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality,” *Journal of Applied Science and Emerging Technology*, vol 22, no. 2, pp. e246935, 2023.
- [9] วุฒิชัย พรพิชรพงศ์ และ ภัทราวลัย คำปลิว, “ระบบแจ้งเตือนอัคคีภัยโดยใช้ภาพถ่ายความร้อนและภาพเหตุการณ์จริงแบบประหยัด,” *วารสารวิชาการ การจัดการเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 73-82, มกราคม - มิถุนายน 2565.
- [10] พศวีร์ ศรีโหมด, เต็มพงษ์ ศรีเทศ, เอกชัย ดีศิริ และ ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี, “ชุดสาธิตระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้แบบไร้สาย,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 16*, กรุงเทพมหานคร, 28 ตุลาคม 2564, หน้า 2173-2182.

- [11] จิตติ สัมภัตตะกุล และ พีระพงษ์ พรหมจันทร์, “การพัฒนาระบบเฝ้าระวัง และแจ้งเตือนอัคคีภัยกองทัพอากาศ,” *วารสารวิชาการ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 96-108, มกราคม - มิถุนายน 2564.
- [12] อรรถพล อมาตย์กุล, “ระบบแจ้งเตือนผู้บุกรุกด้วยอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหวอินฟราเรดแบบพาสซีฟบนพื้นฐานของอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง,” *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต*, มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี, 2564.
- [13] OLONITE, Oluyemi Ayodele, “*Olonite Sampling Technique and Taro Yamane Sampling Method: The Paradigm Shift.*” [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3994018> (Accessed: July. 1, 2021).

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบอาคารขนาดเล็กรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานเพื่อใช้ในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มวกเหล็ก

Development of Mathematical Models to Analyze the Impact of Geometric Small-Scale Building Designs on Energy Efficiency: A Case Study at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Muak Lek

สิริญญา ถนอมพลกรัง^{1*}, สมภูมิ มีชานนา², วิศรุต คล้ายแจ้ง³ และ ศิริกุล ศิริธีรกุล⁴

^{1, 2, 3}กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

⁴ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Sirunya Thanompolkrang^{1*}, Sompoom Meechowna², Witsarut Kraychang³
and Sirikul Siriteerakul⁴

^{1, 2, 3}Faculty of Academic Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

⁴Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Sirunya_th@taf.mi.th

Received 29 July 2025

Revised 18 September 2025

Accepted 27 September 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วัดค่าอุณหภูมิความร้อนภายในอาคารที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปเรขาคณิตแบบสมมาตร ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดมีพื้นที่เท่ากัน และในกรณีพื้นที่หน้าตัดมีความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน เพื่อศึกษาการแพร่กระจายความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารโดยมีตัวกลางเป็นกำแพงและอากาศด้านในอาคาร โดยนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบของ Contour ของภาพแสดงระดับของความร้อนที่แพร่กระจายเข้ามาภายในอาคาร เส้นกราฟแสดงค่าอุณหภูมิโดยพิจารณาจากจุดอ้างอิง พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิความร้อนภายในอาคารขึ้นอยู่กับแนวการรับแสงจากดวงอาทิตย์มากกว่าชนิดของอาคาร

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วิถีไฟไนต์เอลิเมนต์, อาคารรูปทรงเรขาคณิต

Abstract

This research presents a mathematical model for evaluating the internal temperature of buildings with symmetrical geometric cross-sections, including rectangles, hexagons, and octagons. It examines scenarios where the cross-sectional areas or perimeters are equal. The study focuses on the transfer of heat from the outside to the inside, with walls and indoor air as the mediums. Results

are presented as contour plots that depict heat diffusion levels within the building, along with temperature distribution graphs values based on reference points. The results suggest that the internal temperature is more significantly affected by the direction of sunlight than by the type of building.

Keywords: Mathematical Model, Finite Element Method, Geometric Building

1. บทนำ

ปัญหาโลกร้อนในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นจากการใช้เครื่องปรับอากาศภายในอาคารขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ภายในกองทัพอากาศ เนื่องมาจากความร้อนจากผนังด้านนอกสู่ผนังด้านในอาคารโดยมีกำแพงเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยความร้อนนี้ได้รับผลจากดวงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละปีมีแนวโน้มสูงขึ้นโดยอ้างอิงข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งมีงานวิจัยที่วิจัยเกี่ยวกับการออกแบบอาคาร วิจัยเรื่องวัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพงที่ช่วยลดความร้อนจากผนังด้านนอกอาคาร เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานภายในอาคาร

การประเมินอุณหภูมิภายในอาคารโดยการวัดตรงมีข้อจำกัด เนื่องจากอากาศเป็นตัวกลางที่ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง การจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับหาค่าความร้อนเพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากใช้ข้อมูลภาคสนามบางส่วน ประหยัดทรัพยากรและต้นทุน โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านตัวกลางที่เป็นกำแพงสู่บริเวณภายในอาคารที่มีตัวกลางเป็นอากาศของอาคารรูปทรงทางเรขาคณิต

โดยในงานวิจัยนี้เป็นการแสดงถึงการใช้คณิตศาสตร์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือเชิงวิเคราะห์ในการตัดสินใจออกแบบอาคารขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้สร้างภายในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มวกเหล็กและขยายสู่กองทัพอากาศ โดยการใช้องค์ความรู้ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง กระบวนการแก้สมการ การใช้ตัวแบบทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการยกตัวอย่างของปัญหาที่ถูกใช้แก้ปัญหาจริงให้กับนักเรียนนายเรืออากาศ

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกสู่ผนังภายในอาคารโดยใช้วัสดุคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมอญ และคอนกรีตบล็อก [1, 2] และมีงานวิจัยที่วิเคราะห์พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร [3, 7] ซึ่งส่วนใหญ่ในงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองแบบคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนนี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหา คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [4 - 6]

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ในงานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองของอาคารขนาดเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปเรขาคณิตแบบสมมาตร ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม

2.2 ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการหาค่าความร้อนภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตทั้งสามแบบเฉพาะในกรณีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน และในกรณีความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน

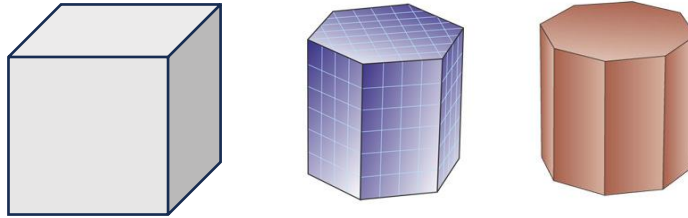
2.3 ตัวกลางการนำความร้อนที่ใช้ในการงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกำแพงและอากาศ และจะใช้สมการความร้อนใน 2 มิติ ภายใต้สมมติฐานว่าอากาศภายในไม่มีการไหลเวียน

2.4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ปัญหา คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 รูปทรงทางเรขาคณิตแบบสมมาตร

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาอาคารหรือห้องที่มีลักษณะสมมาตรที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า หกเหลี่ยมด้านเท่า และแปดเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งจะศึกษาในกรณีที่อาคารรูปทรงทั้งสามนี้มีพื้นที่เท่ากันและกรณีที่อาคารรูปทรงทั้งสามนี้มีความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน



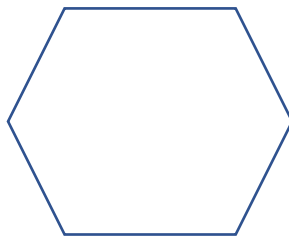
รูปที่ 1 อาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า หกเหลี่ยมด้านเท่า แปดเหลี่ยมด้านเท่า

3.1.1 พื้นที่หน้าตัดของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า หกเหลี่ยมด้านเท่า และแปดเหลี่ยมด้านเท่า

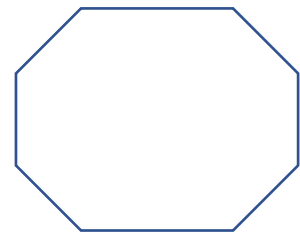
การพิจารณาการหาอุณหภูมิความร้อนในอาคารจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ โดยพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดของอาคารประกอบไปด้วย รูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า รูปหกเหลี่ยมด้านเท่า และรูปแปดเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งมีเส้นรอบรูปและพื้นที่ดังต่อไปนี้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2 รูปหน้าตัดของ (a) อาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านเท่า (b) อาคารรูปทรงหกเหลี่ยมด้านเท่า (c) อาคารรูปทรงแปดเหลี่ยมด้านเท่า

ตารางที่ 1 ความยาวเส้นรอบรูปและพื้นที่ของรูปทรงทางเรขาคณิต

	รูปสี่เหลี่ยม (a)	รูปหกเหลี่ยม (b)	รูปทรงแปดเหลี่ยม (c)
ความยาวเส้นรอบรูป	$4L$ หน่วย	$6L$ หน่วย	$8L$ หน่วย
พื้นที่	L^2 ตารางหน่วย	$2.598L^2$ ตารางหน่วย	$4.284L^2$ ตารางหน่วย

3.2 สมการความร้อนใน 2 มิติ

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายและหาค่าอุณหภูมิความร้อนภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตแบบสมมาตรจะใช้สมการความร้อนใน 2 มิติ เป็นสมการควบคุมของปัญหานี้ โดยมีกระบวนการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : หาค่าอุณหภูมิความร้อนภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิต

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดสมการควบคุมของปัญหา : สมการความร้อนใน 2 มิติ เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ

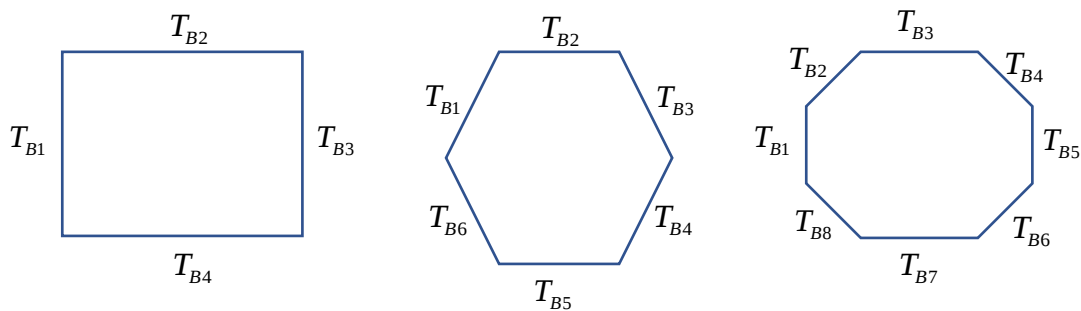
ขั้นตอนที่ 3 กำหนดระเบียบวิธีในการแก้สมการควบคุม : ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการ : ค่าอุณหภูมิความร้อนใช้สำหรับอธิบายปัญหา

สมการความร้อนใน 2 มิติ เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่เป็นปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้หาค่าอุณหภูมิความร้อนที่มีตัวกลางในการนำความร้อนดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

เมื่อ $T(x, y, t)$ คือ ค่าอุณหภูมิความร้อนที่ตำแหน่ง $(x, y) \in \Omega$ เมื่อเวลา t และ Ω เป็นขอบเขตใน 2 มิติ และ α เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนของวัสดุ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น (อุณหภูมิเริ่มต้น) $T(x, y, 0) = T_0$ และเงื่อนไขขอบ (อุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยที่ขอบ) เป็นค่าคงที่เป็นไปตามรูปแบบของพื้นที่หน้าตัดของอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตแบบสมมาตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เงื่อนไขขอบของรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า รูปหกเหลี่ยมด้านเท่า และรูปแปดเหลี่ยมด้านเท่า

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ในการหาผลเฉลยที่เป็นค่าอุณหภูมิความร้อนของสมการความร้อนใน 2 มิติ (1) มีหลายวิธี เช่น Finite Different Method, Finite Element Method, Finite Volume Method ในเลือกใช้ระเบียบวิธีในการแก้ปัญหาจะพิจารณาจากโดเมนและจำนวนมิติของงานวิจัยที่จะศึกษา เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหาค่าอุณหภูมิความร้อน 2 มิติ โดยจะพิจารณานำพื้นที่หน้าตัดของอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตแบบสมมาตร ที่ได้จากอาคารรูปทรง 3 มิติ จะได้รูปเหลี่ยมด้านเท่าที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม จากการพิจารณานี้ระเบียบวิธีการที่เหมาะสมต่อการแก้หาผลเฉลยจะใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสมที่สุด [3, 5] ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองของระบบแล้วแบ่งแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละเอลิเมนต์อาจมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกันไป

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Shape Function) โดยที่แต่ละจุดจะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับพิกัดแต่ละจุดต่อ โดยลักษณะการกระจายของตัวแปรไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และตัวแปรที่จุดต่อโดยมีรูปแบบ ดังนี้

$$\phi(x, y, z) = N_1(x, y, z)\phi_1 + N_2(x, y, z)\phi_2 + N_3(x, y, z)\phi_3 + N_4(x, y, z)\phi_4 \quad (2)$$

โดยที่ $\phi(x, y, z)$ เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $N_i(x, y, z)$, $i = 1, 2, 3, 4$ เป็นฟังก์ชันประมาณค่าภายใน
 เอลิเมนต์หรือสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y, z) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ที่ต้องการทราบคำตอบ โดยมีรูปแบบสมการ
 ดังนี้

$$[k]_e \{\phi\}_e = \{f\}_e \quad (4)$$

โดยที่ $[k]_e$ คือ เอลิเมนต์เมทริกซ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหานั้น (Element Matrix)

$\{\phi\}_e$ คือ เวกเตอร์ของตัวแปรไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Vector of Nodal Unknowns)

$\{f\}_e$ คือ เวกเตอร์ของโหลดที่จุดต่อ (Vector of Nodal Loads)

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ สมการของเอลิเมนต์จะมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากการเรียงตัวของชิ้นส่วนย่อยในแบบจำลอง จะไม่ขนานหรือตั้งฉากกับระบบแกนรวม
 ใหญ่ XY แต่จะบิดเอียงไปตามรูปร่างของชิ้นส่วนย่อยหรือที่เรียกว่าระบบแกนย่อย $\xi\eta$ ดังนั้น การเลือกวิธีการเชิง
 ตัวเลขขึ้นอยู่กับลักษณะโดเมนและมิติของปัญหา ในกรณีนี้จึงเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเหมาะสมที่สุด บนพื้นที่
 ของชิ้นส่วนย่อยที่เอียงไปมาในพิภพ XY ต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนย่อยที่เอียงไปมาให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในพิภพ $\xi\eta$
 โดยมีฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Shape Function) ดังนี้

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned} \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 5 นำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยมีรูปแบบ ดังนี้

$$[K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (7)$$

ขั้นตอนที่ 6 แทนเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ลงในสมการรวมของระบบ

ขั้นตอนที่ 7 แก้สมการของระบบเพื่อหาค่าโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

4. การดำเนินการวิจัย

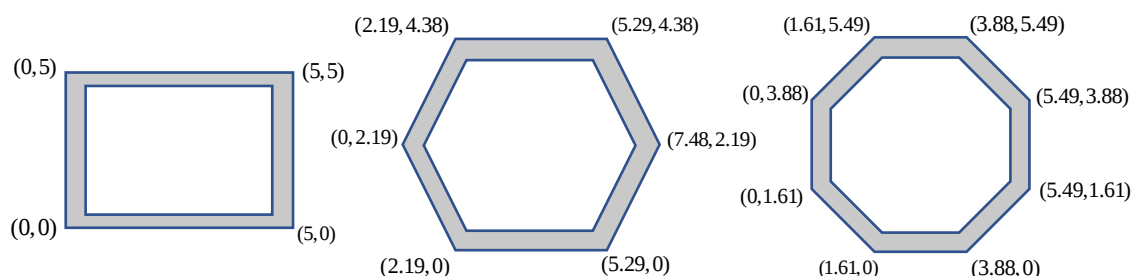
4.1 กำหนดปัญหา

เพื่อศึกษาการนำความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตแบบสมมาตรทั้งสามรูปจะมีผลต่ออุณหภูมิภายในอาคารอย่างไร การวิเคราะห์ดำเนินการใน 2 กรณี ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน และความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน กำหนดความหนาของกำแพงของอาคาร ในหัวข้อนี้จะกำหนดค่าของขนาดพื้นที่เท่ากัน ความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน และหาค่าจุดพิกัดของอาคารในระบบพิกัดฉากเพื่อง่ายต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

4.1.1 กำหนดขนาดของอาคาร

กรณีพื้นที่หน้าตัดของอาคารเท่ากัน

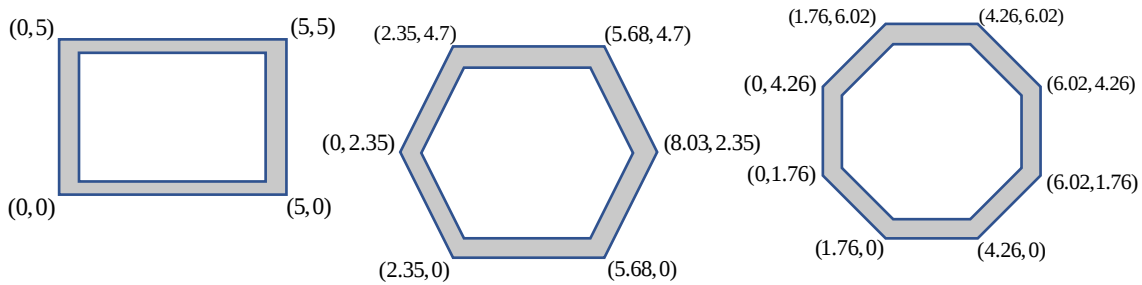
ในกรณีนี้จะศึกษาการนำค่าความร้อนจากภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารโดยผ่านตัวกลาง คือ กำแพงหนา 0.1 เมตรและสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกำแพงเท่ากับ 1 เพื่อศึกษาหาค่าอุณหภูมิภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ที่มีพื้นที่หน้าตัดของอาคารเท่ากัน ในกรณีศึกษานี้จะกำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 25 ตารางเมตร โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4 ค่าพิกัด (x, y) ของอาคารพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม กรณีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

กรณีความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัดของอาคารเท่ากัน

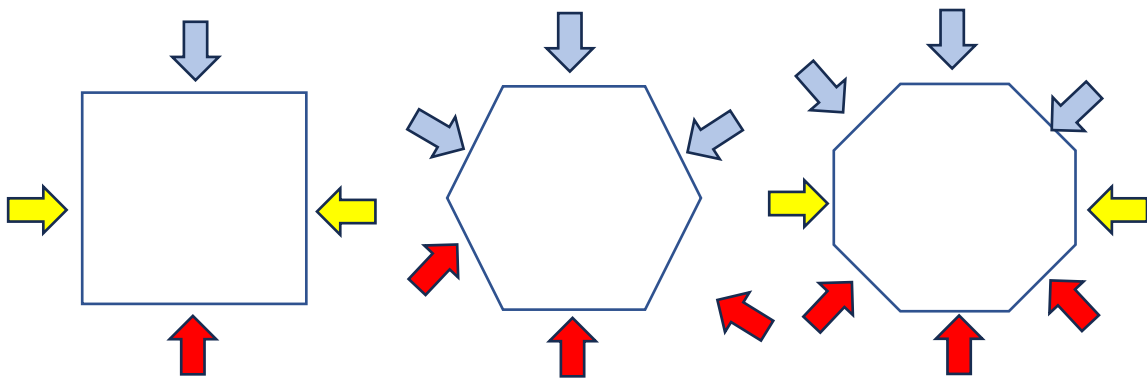
ในกรณีนี้จะศึกษาการนำค่าความร้อนจากภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารโดยผ่านตัวกลาง คือ กำแพงหนา 0.1 เมตรและสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกำแพงเท่ากับ 1 เพื่อศึกษาหาค่าอุณหภูมิภายในอาคารรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ที่มีความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของอาคารเท่ากัน โดยในกรณีศึกษานี้จะกำหนดให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 20 เมตร โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 5 ค่าพิกัด (x, y) ของอาคารพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม กรณีความยาวเส้นรอบรูปเท่ากัน

4.1.2 กำหนดค่าเงื่อนไขขอบและเงื่อนไขเริ่มต้น

อุณหภูมิความร้อนจากดวงอาทิตย์ส่งผลให้ผนังของอาคารมีค่าอุณหภูมิความร้อนทำให้เกิดการนำความร้อนจากผนังด้านนอกสู่ภายในอาคารส่งผลต่ออุณหภูมิภายในอาคารที่สูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ยของอาคาร และแต่ละผนังของอาคารจะมีค่าอุณหภูมิไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและทิศทางของตำแหน่งของดวงอาทิตย์



รูปที่ 6 ทิศทางอุณหภูมิความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ของแต่ละด้านของอาคารรูปทรงทางเรขาคณิต

ผลของทิศทางแสงอาทิตย์ถูกกำหนดเป็นค่าอุณหภูมิขอบเขตแตกต่างกันตามแต่ละด้านของอาคาร ดังรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ลูกศรสีแดงแสดงค่าความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์มากที่สุดโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส สำหรับรูปสี่เหลี่ยม 1 ด้าน รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม 3 ด้าน ลูกศรสีเหลืองแสดงแสงเข้าผนังอาคารได้ไม่เต็มที่เท่ากับด้านหน้าทำให้อุณหภูมิผนังด้านลูกศรสีเหลืองมีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยกำหนดให้มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส และด้านหลังของอาคารแสงส่องได้น้อยที่ผนังด้านลูกศรสีฟ้าโดยกำหนดอุณหภูมิผนังนี้มีค่าเท่ากับ 28 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิความร้อนที่ผนังของอาคาร เรียกว่า ค่าเงื่อนไขขอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Boundary Conditions) เมื่อเริ่มต้นการคำนวณการหาอุณหภูมิความร้อนกำหนดให้อุณหภูมิภายในอาคารมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส เรียกว่า เงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Initial Condition)

4.2 โปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

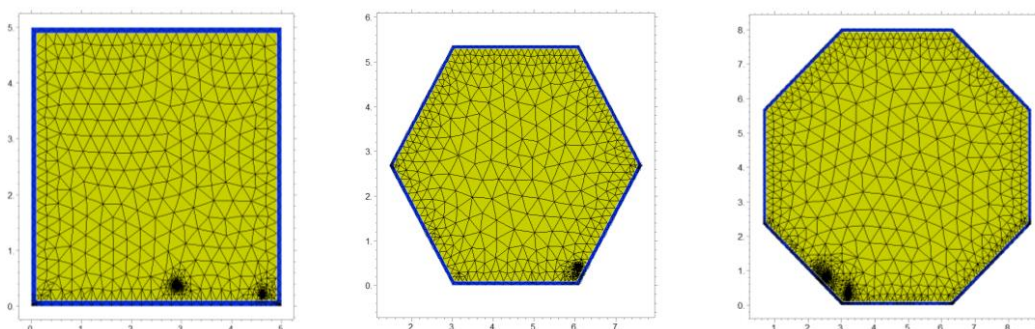
จากหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 ได้เสนอการกำหนดพื้นที่และความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของอาคารรูปทรงต่าง ๆ โดยการกำหนดค่าจุดศูนย์กลางบนระบบพิกัดฉาก การกำหนดความหนาของผนังของอาคาร ค่าการนำความร้อน ทิศทางของดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิความร้อนต่อผนังของอาคาร การกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น

ภายในอาคาร เพื่อนำข้อมูลนี้ไปเป็นค่านำเข้าสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของกราฟแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของอาคารที่เสนอในรูปแบบ 2 มิติ ที่เป็นรูปพื้นที่หน้าตัดของอาคารของแต่ละกรณี โดยโปรแกรม FlexPDE

5. ผลการวิจัย

5.1 เอลิเมนต์ของพื้นที่หน้าตัดของอาคาร

ขั้นตอนแรกของการหาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการสร้างเอลิเมนต์บนพื้นที่หน้าตัดของอาคารที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม โดยจะใช้เอลิเมนต์เป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 7



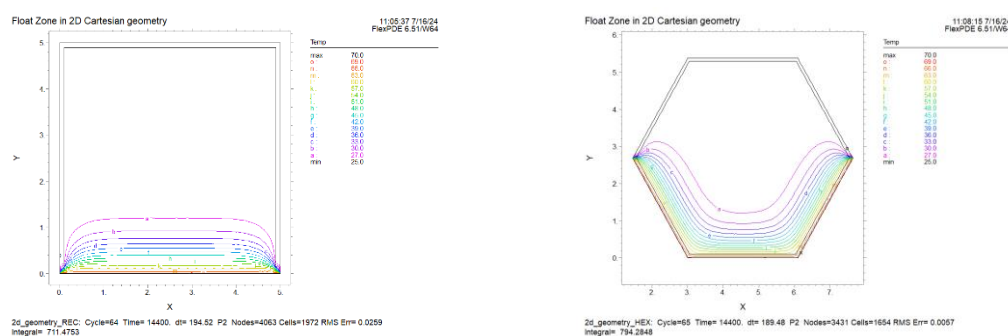
รูปที่ 7 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมบนพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม

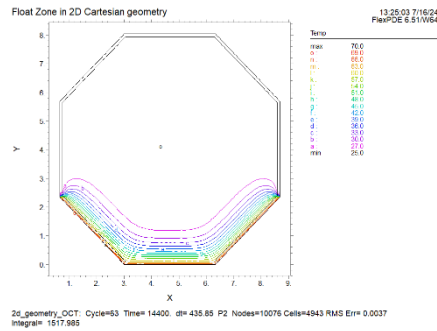
5.2 ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้จะแสดงผลในรูปแบบของกราฟ Contour ของค่าอุณหภูมิความร้อนของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม กราฟแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนที่ตำแหน่งของจุดอ้างอิงบนพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยมในแนวต่าง ๆ ในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดของอาคารมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและกรณีที่พื้นที่หน้าตัดมีเส้นรอบรูปเท่ากัน โดยจะแสดงผลดังต่อไปนี้

5.2.1 กรณีพื้นที่หน้าตัดของอาคารมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

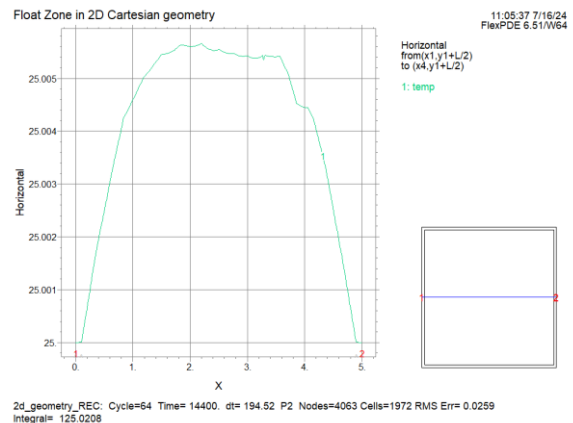
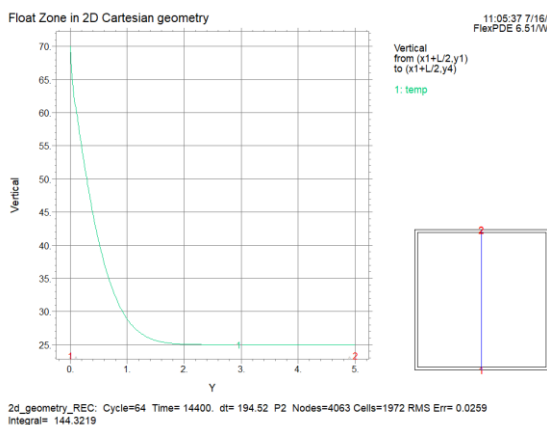
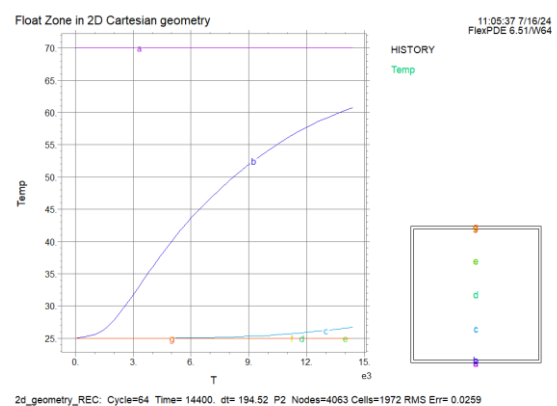
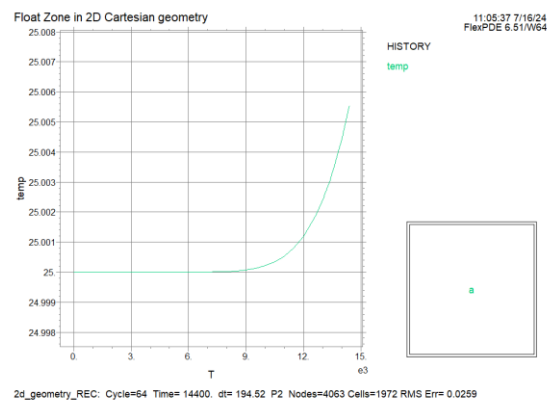
หัวข้อนี้จะแสดงผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะนำเสนอรูปแบบของกราฟ contour จะแสดงเส้นระดับของค่าอุณหภูมิความร้อนเมื่อมีความร้อนจากภายนอกผ่านกำแพงเข้ามาภายในอาคารรูปทรงสมมาตรทั้งสาม และกราฟเส้นที่แสดงค่าอุณหภูมิความร้อนที่จุดอ้างอิงในแนวต่าง ๆ บนพื้นที่หน้าตัด ดังนี้



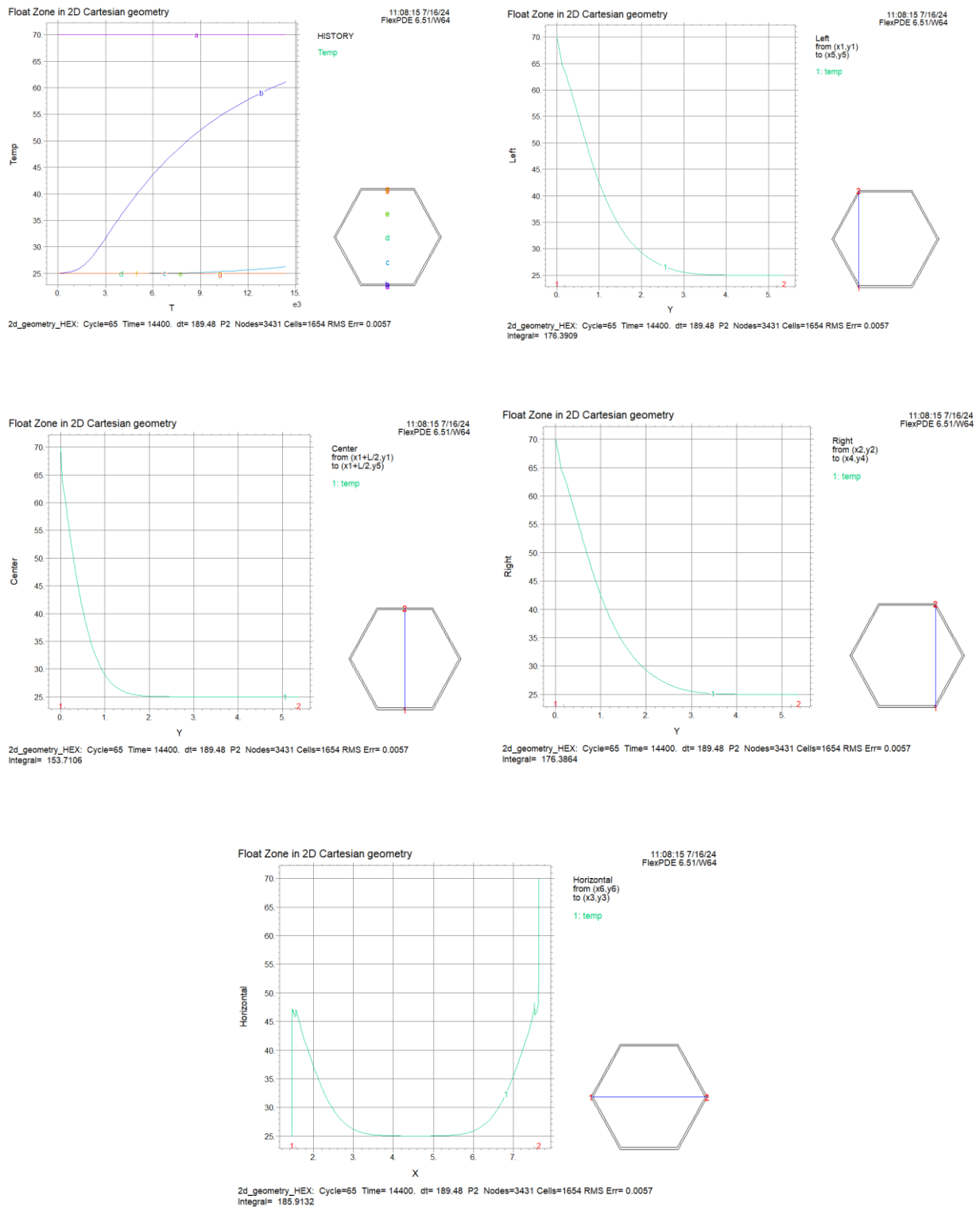


รูปที่ 8 กราฟ Contour กรณีสถานการณ์ที่หน้าตัดเท่ากันของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม

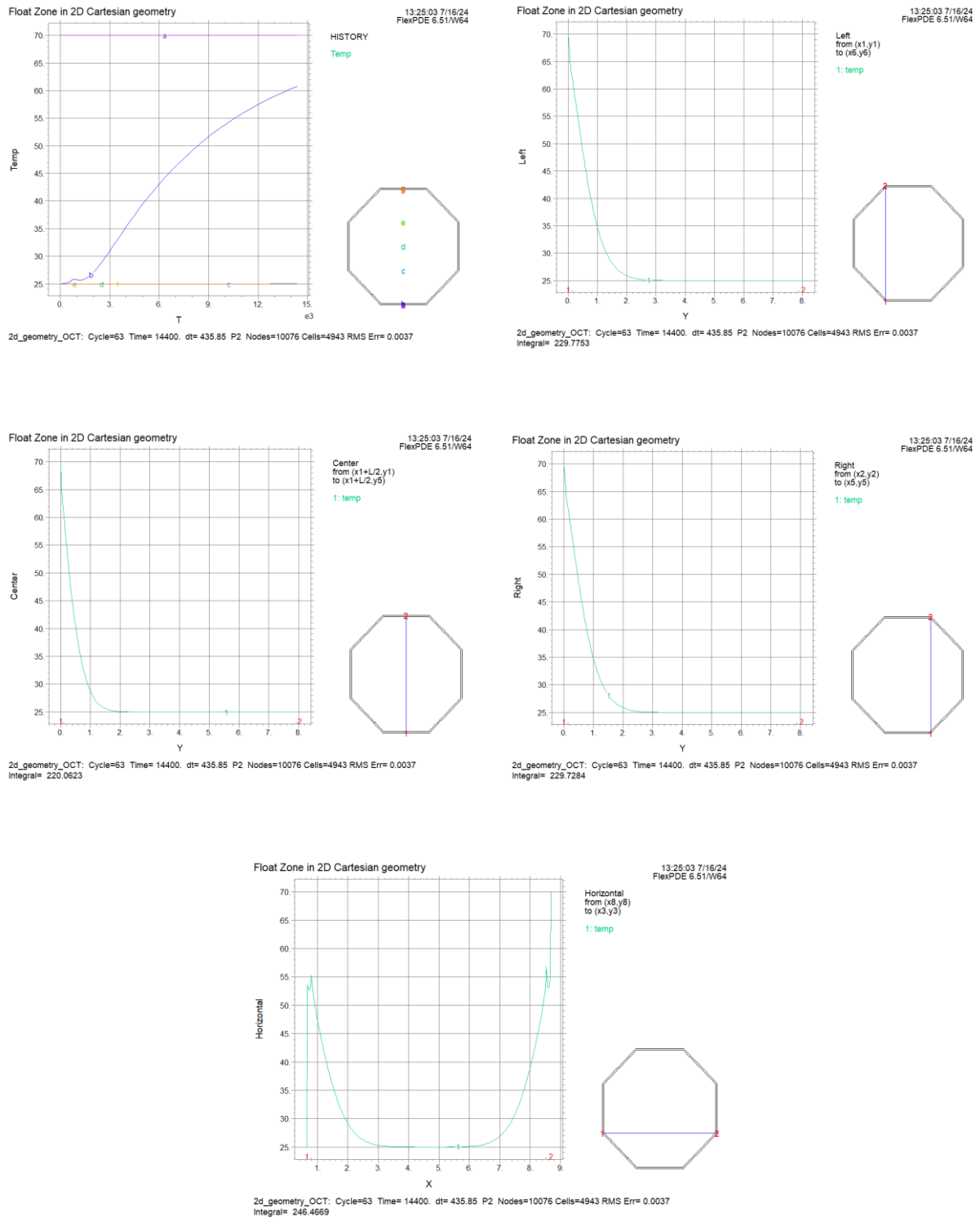
รูปที่ 8 แสดงเส้นระดับของค่าอุณหภูมิความร้อนที่แพร่กระจายเข้ามาจากผนังด้านนอกของกำแพงมาถึงภายในอาคารรูปทรงสมมาตรทั้งสาม โดยพิจารณาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ ในกรณีที่พื้นที่เท่ากัน พบว่า ผลการคำนวณแสดงว่า ณ เวลา 14,400 วินาที การแพร่กระจายความร้อนยังไม่ถึงจุดศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัด อาคารทรงหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมมีพื้นที่ผนังที่รับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงมากกว่าทรงสี่เหลี่ยม ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายความร้อนจากหลายทิศทาง



รูปที่ 9 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปสี่เหลี่ยม (1) ที่จุด a ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (3) เส้นแนวดิ่งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นตามขวางที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที



รูปที่ 10 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปหกเหลี่ยม (1) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) เส้นแนวดิ่งด้านซ้ายที่เวลา 14,400 วินาที (3) เส้นแนวดิ่งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นแนวดิ่งด้านขวาที่เวลา 14,400 วินาที (5) เส้นตามขวางที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที



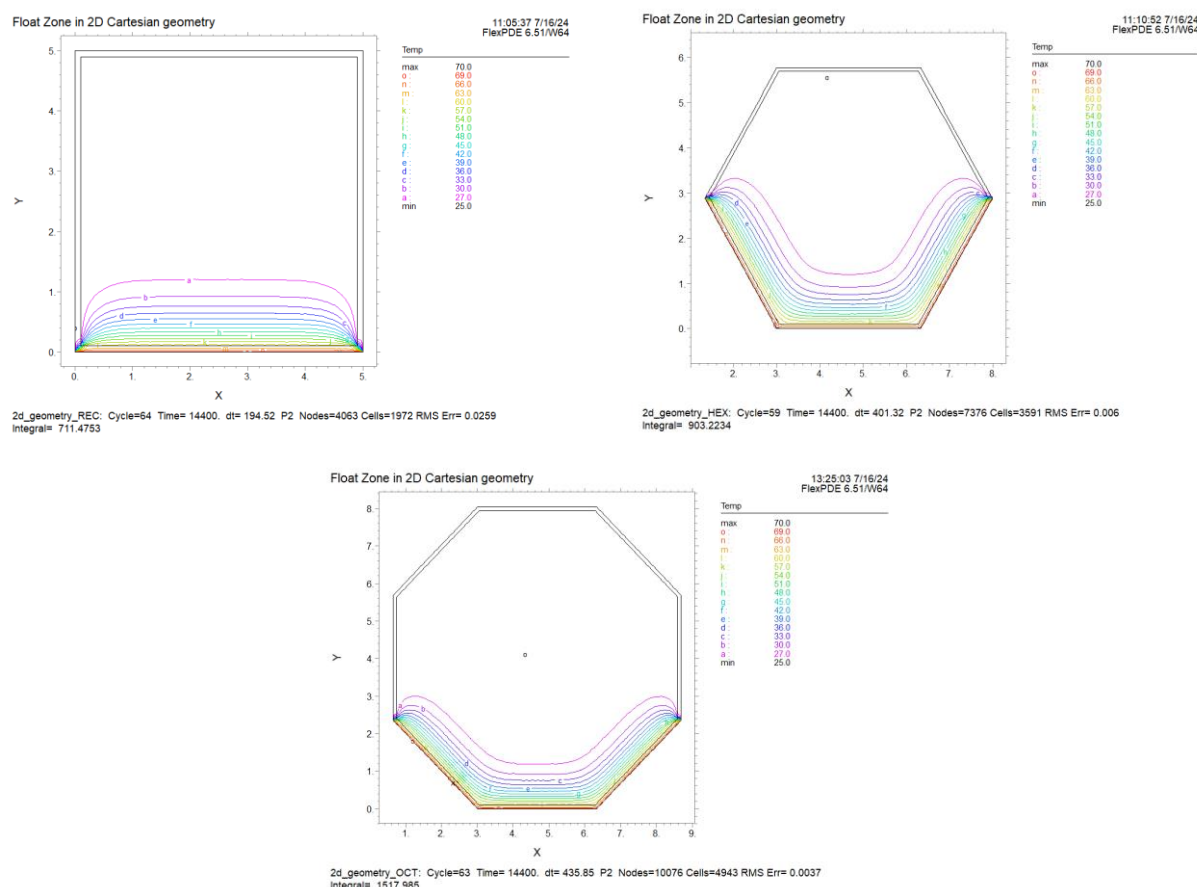
รูปที่ 11 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปแปดเหลี่ยม (1) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) เส้นแนวดิ่งด้านซ้ายที่เวลา 14,400 วินาที (3) เส้นแนวดิ่งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นแนวดิ่งด้านขวาที่เวลา 14,400 วินาที (5) เส้นตามขวางด้านล่างที่เวลา 14,400 วินาที

สำหรับรูปที่ 9-11 ใช้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดอ้างอิง (a-g) ตลอดช่วงเวลา 0-14,400 วินาที และแนววิเคราะห์ในแต่ละทิศทางเมื่อครบเวลา 14,400 วินาที ตามลำดับ

จากกรณีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน พบว่า อาคารรูปทรงหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยมมีการแพร่กระจายความร้อนเข้าสู่ภายในมากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม เนื่องจากจำนวนด้านที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์มีมากกว่า แม้ว่าความร้อนยังไม่ถึงจุดกึ่งกลางพื้นที่หน้าตัดภายในช่วงเวลาศึกษา (14,400 วินาที)

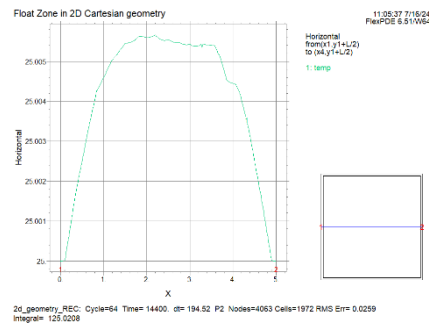
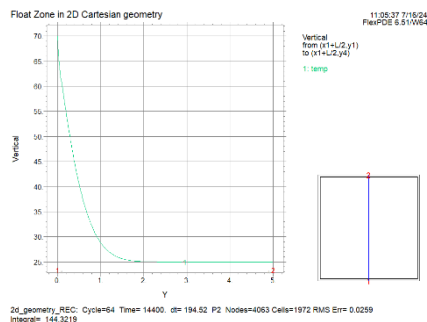
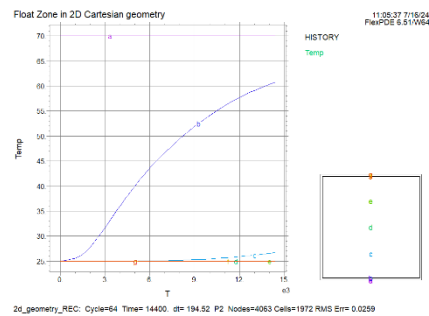
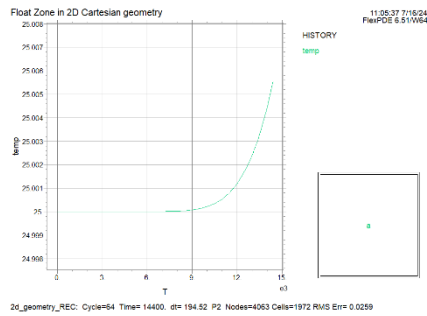
5.2.2 กรณีพื้นที่หน้าตัดของอาคารมีเส้นรอบรูปเท่ากัน

หัวข้อนี้จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะนำเสนอรูปแบบของกราฟ contour จะแสดงเส้นระดับของค่าอุณหภูมิความร้อนเมื่อมีความร้อนจากภายนอกผ่านกำแพงเข้ามาภายในอาคาร รูปทรงสมมาตรทั้งสามและกราฟเส้นที่แสดงค่าอุณหภูมิความร้อนที่จุดอ้างอิงในแนวต่าง ๆ บนพื้นที่หน้าตัด ดังนี้



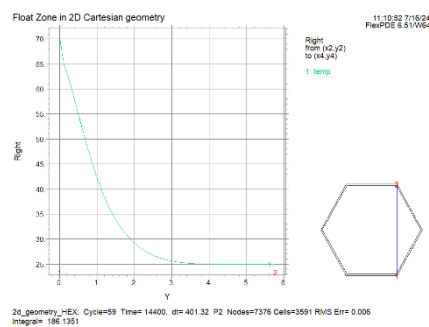
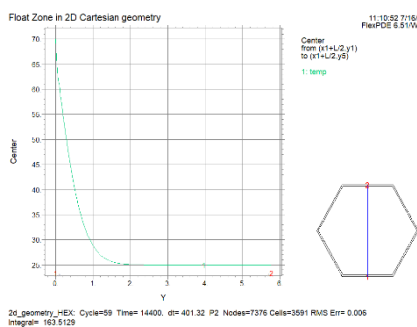
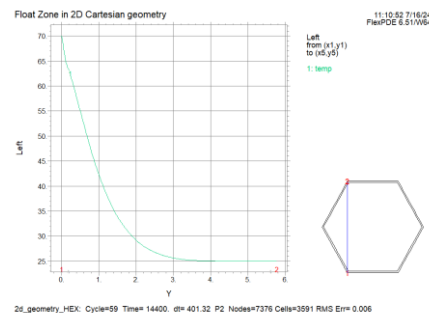
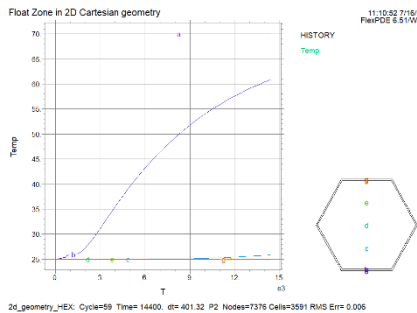
รูปที่ 12 กราฟ Contour กรณีเส้นรอบรูปเท่ากันของพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม

รูปที่ 12 แสดงเส้นระดับของค่าอุณหภูมิความร้อนที่แพร่กระจายเข้ามาจากผนังด้านนอกของกำแพงมาถึงภายในอาคารรูปทรงสมมาตรทั้งสาม โดยพิจารณาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ ในกรณีที่เส้นรอบรูปเท่ากันพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 14,400 วินาที อาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม ความร้อนยังไม่แพร่กระจายเข้ามาใกล้จุดศูนย์กลางของอาคาร อาคารรูปทรงหกเหลี่ยม ความร้อนยังไม่แพร่กระจายเข้ามาใกล้จุดศูนย์กลางของอาคาร แต่มีการแพร่กระจายเข้ามาทั้ง 3 ด้านเนื่องจากอาคารรูปทรงหกเหลี่ยมนี้มีแนวรับความร้อนจากทิศทางของดวงอาทิตย์มากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยม อาคารรูปทรงแปดเหลี่ยม ความร้อนยังไม่แพร่กระจายเข้ามาใกล้จุดศูนย์กลางของอาคาร แต่มีการแพร่กระจายเข้ามาทั้ง 3 ด้าน เนื่องจากอาคารรูปทรงแปดเหลี่ยมนี้มีแนวรับความร้อนจากทิศทางของดวงอาทิตย์มากกว่ารูปทรงสี่เหลี่ยมแต่ด้านที่ได้รับความร้อนของรูปทรงสี่เหลี่ยมจะน้อยกว่ารูปทรงหกเหลี่ยม

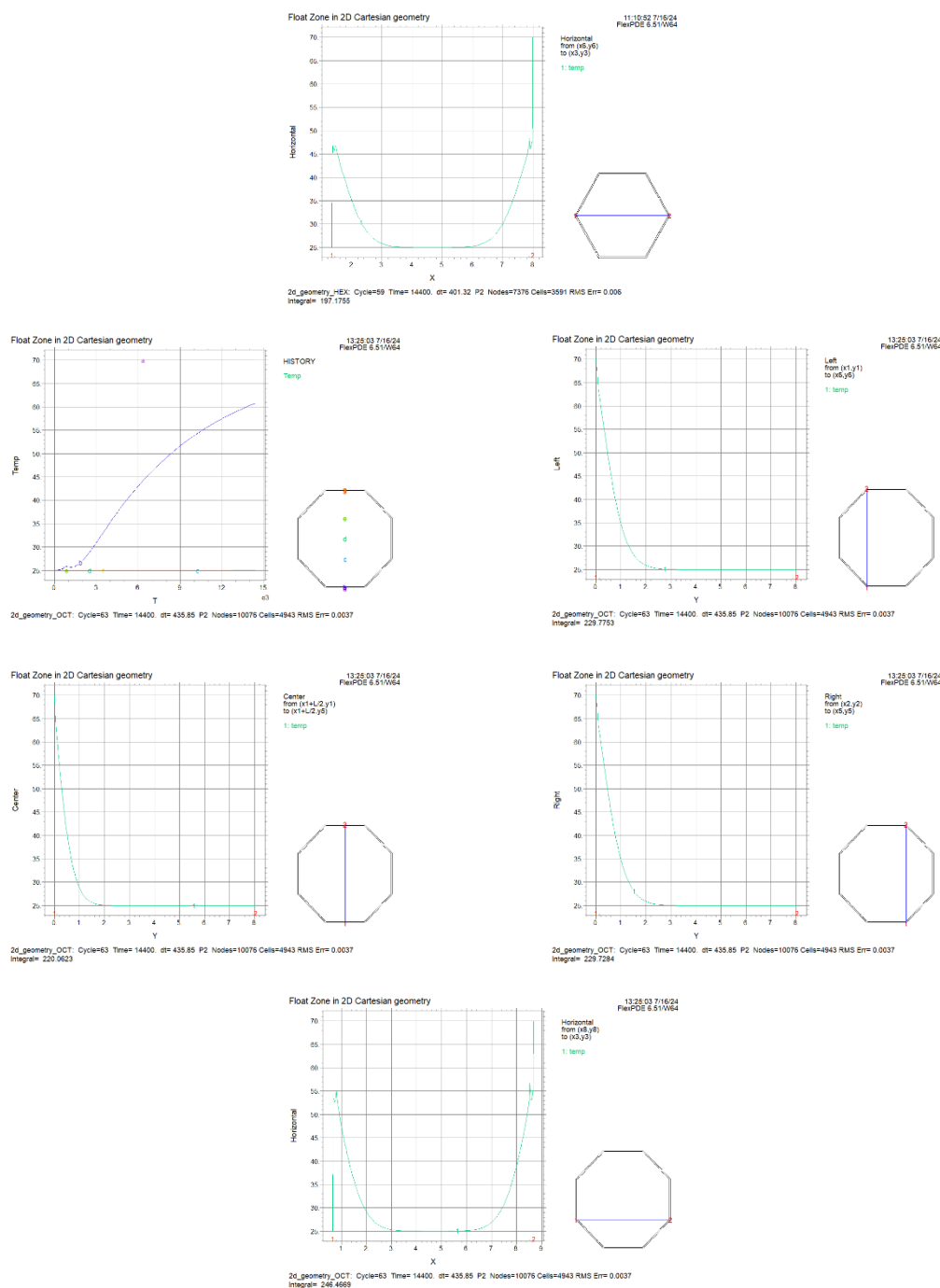


รูปที่ 13 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปสี่เหลี่ยม (1) ที่จุด a ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (3) เส้นแนวตั้งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นตามขวางที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที

สำหรับรูปที่ 13 (1-2 ส่วนบน) ดูพฤติกรรมการแพร่กระจายของความร้อนที่จุดอ้างอิง a b c d e และ g ตั้งแต่เริ่มต้นเวลา 0 วินาที จนถึง 14,400 วินาที รูปที่ 13 (3-4 ส่วนล่าง) ดูพฤติกรรมการแพร่กระจายของความร้อนที่แนวตั้งและแนวนอนที่ผ่านจุดกึ่งกลางของอาคารตามลำดับ เมื่อเวลา 14,400 วินาที ของรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 14 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปหกเหลี่ยม (1) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) เส้นแนวตั้งด้านซ้ายที่เวลา 14,400 วินาที (3) เส้นแนวตั้งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นแนวตั้งด้านขวาที่เวลา 14,400 วินาที (5) เส้นตามขวางที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที



รูปที่ 15 กราฟเส้นแสดงค่าอุณหภูมิความร้อนของรูปแปดเหลี่ยม (1) ที่จุด a b c d e และ g ที่เวลา 0 ถึง 14,400 วินาที (2) เส้นแนวตั้งด้านซ้ายที่เวลา 14,400 วินาที (3) เส้นแนวตั้งที่ผ่านจุดกึ่งกลางที่เวลา 14,400 วินาที (4) เส้นแนวตั้งด้านขวาที่เวลา 14,400 วินาที (5) เส้นตามขวางด้านล่างที่เวลา 14,400 วินาที

สำหรับรูปที่ 14-15 (1) ศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของความร้อนที่จุดอ้างอิง a b c d e และ g ตั้งแต่เริ่มต้นเวลา 0 วินาที จนถึง 14,400 วินาที และรูปที่ 14-15 (2-5) ดูพฤติกรรมการแพร่กระจายของความร้อน 4 แนว โดยพิจารณาจากจุดมุมไปยังจุดมุมอื่นประกอบด้วยแนวตั้ง (Vertical) 3 แนวและแนวนอน (Horizontal) 1 แนว เมื่อเวลา 14,400 วินาที ของรูปหกเหลี่ยมและแปดเหลี่ยม ตามลำดับ

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีที่สะดวกและประหยัดในการศึกษาการแพร่ความร้อนต่อการศึกษาค่าอุณหภูมิความร้อนภายในอาคารโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำเสนอการใช้รูปทรงทางเรขาคณิตมาเป็นแนวคิดในการสร้างอาคารเพื่อศึกษาว่ารูปทรงของอาคารมีผลต่อการแพร่กระจายความร้อนภายในอาคารอย่างไร ภายในเงื่อนไขของการมีพื้นที่ที่จำกัดสำหรับการสร้างอาคาร ในงานวิจัยนี้เสนอในรูปแบบของอาคารรูปทรงสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ในกรณีของพื้นที่หน้าตัดเท่ากันและกรณีความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน อุณหภูมิจากภายนอกแพร่เข้ามาภายในอาคารโดยมีกำแพงเป็นตัวกลางและอากาศเป็นตัวกลางของการแพร่ความร้อนเนื่องจากไม่มีการไหลเวียนของอากาศภายในอาคาร พบว่า ความร้อนยังไม่แพร่ถึงจุดกึ่งกลางหรือมีค่าน้อยมาก แต่ค่าอุณหภูมิความร้อนจะอยู่ขอบกำแพงของอาคารตรงบริเวณที่ได้รับแสง จากผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปหกเหลี่ยมมีพื้นที่การรับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากกว่ารูปทรงอื่นทำให้ความร้อนแพร่กระจายเข้ามาได้มากกว่า ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการสร้างอาคารรูปทรงเรขาคณิตในรูปแบบสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม ไม่ส่งผลการแพร่ความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารโดยมีกำแพงและอากาศเป็นตัวกลางโดยที่ไม่มีการไหลของอากาศ กล่าวคือปัจจัยที่ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้น คือ ด้านของอาคารที่มีพื้นที่รับแสงจากดวงอาทิตย์

7. ข้อเสนอแนะ

อุณหภูมิความร้อนสามารถมาจากแหล่งภายนอกอาคาร ได้แก่ อุณหภูมิความร้อนจากแสงอาทิตย์ และแหล่งในอาคาร ได้แก่ อุณหภูมิจากสิ่งของภายในห้องรวมถึงจากการปลดปล่อยความร้อนจากสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในห้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาค่าอุณหภูมิความร้อนที่มาจากภายนอกอาคาร ดังนั้น สำหรับการพิจารณาค่าอุณหภูมิภายในห้องหรืออาคารสามารถเป็นแนวคิดงานวิจัยต่อไปได้

8. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยนี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณกองทัพอากาศที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้ดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่อนุญาตให้ใช้สถานที่เพื่อการวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการติดตามงานวิจัยและให้ข้อเสนอแนะ ขอขอบคุณทีมวิจัยทุกท่าน

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิศรุต คล้ายแจ้ และ นพรัตน์ โพธิ์ชัย, “การจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกสู่ผนังภายในอาคารโดยใช้วัสดุคอนกรีตมวลเบาคอนกรีตมอดูและคอนกรีตบล็อก,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ฉบับที่ 15, หน้า 9-18, 2562.
- [2] วิศรุต คล้ายแจ้, นพรัตน์ โพธิ์ชัย และ สมภูมิ มีชานา, “การจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกสู่ผนังภายในอาคารโดยใช้วัสดุคอนกรีตมวลเบาคอนกรีตมอดูและคอนกรีตบล็อก,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ฉบับที่ 18, 2563.
- [3] วรากรณ์ พูลจันทร์, เทียนสิริ เหลืองวิไล, วีระพล วิลามาศ, สมภูมิ มีชานา, สุภาวดี สีสายทอ และ สามารถ หมดและ, “การวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารเมื่อใช้วัสดุปิดผิวที่ต่างกันโดยใช้ระเบียบวิธีของแถว,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ฉบับที่ 17, หน้า 1-10, 2564.

- [4] S. T. Tulus, S. Suwaluddin, and T.J. Marpaung, "Optimization temperature in the Room using air conditioner with finite element methods," in *The 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC 2018)*, 2018.
- [5] Z. Hongxia, F. Ake, and O. Thomas, *An Explicit Finite Element Method for Thermal Simulations Buildings with Phase Change Materials*, Energies. 2021.
- [6] ปราโมทย์ เตชะอำไพ, *ไฟในเอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [7] K. Kant, A Shukla and Sharma, "Heat transfer studies of building brick containing phase change materials," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1233-1242, October 2017.

LSTM-Based Approach for Predictive Link Monitoring and RRU Anomaly Detection in 4G/5G Networks

Pannatorn Kijphitayarit¹ and Settawit Poochaya^{2*}

^{1,2}School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima
settawit@sut.ac.th

Received 25 April 2025

Revised 13 June 2025

Accepted 24 June 2025

Abstract

The increasing complexity of 4G and 5G networks has intensified the need for reliable and efficient telecommunication infrastructures. Remote Radio Units (RRUs) are crucial components responsible for ensuring seamless signal transmission between user devices and the core network. However, anomalies in RRU voltage and temperature can cause signal degradation, network inefficiencies, and potential failures. Traditional rule-based fault detection systems often struggle to adapt to dynamic network conditions, necessitating the integration of advanced deep learning models for proactive anomaly detection. Long Short-Term Memory (LSTM) networks have demonstrated superior capabilities in analyzing time-series data, making them well-suited for detecting performance anomalies in RRUs. However, a significant challenge in deploying these models is the class imbalance problem, where normal operational conditions vastly outnumber rare fault instances, leading to biased predictions and poor recall for minority-class anomalies. This research aims to determine the effectiveness of RandomOverSampler in improving the performance of LSTM-based anomaly detection models when applied to imbalanced RRU datasets in the context of 4G/5G network monitoring. To address this, a resampling strategy utilizing RandomOverSampler is implemented to balance the dataset, which consists of 5,000 time-series samples with two key features: voltage and temperature, ensuring improved detection of rare failures without introducing synthetic noise. The proposed framework processes sequential RRU voltage and temperature data, capturing temporal dependencies to improve failure predictions. Performance evaluations show that the minority-class recall improved from 33% to 99%, and the F1-score increased from 32% to 99% after resampling, effectively addressing a major limitation of conventional machine learning-based anomaly detection systems. The model also achieves an

overall accuracy of 99%, demonstrating its robustness and suitability for real-world deployment in mobile network monitoring. Future work will focus on extending this framework to predict Radio Link Failure (RLF) based on RAW RRU data performance patterns.

Keywords: 5G Technology, 4G Technology, LSTM, Imbalanced Data, Time Series

1. Introduction

The rapid expansion of 4G and 5G networks has significantly increased the demand for stable and reliable mobile communication services. Remote Radio Units (RRUs) play a critical role in these networks, serving as the primary interface for signal transmission between user devices and the core network. Ensuring the operational stability of RRUs is essential for maintaining network performance and Quality of Service (QoS). However, voltage fluctuations and temperature anomalies within RRU systems can lead to signal degradation, reduced efficiency, or even complete network failure. According to field observations shared by a global Telco vendor, a key vendor collaborating with SUT under a memorandum of understanding (MOU), such anomalies frequently contribute to unexpected service instability in real-world 4G/5G deployments. As a result, effective anomaly detection mechanisms are crucial for preventing disruptions and ensuring seamless mobile network operations.

Advancements in machine learning and deep learning have enabled the development of automated anomaly detection systems for mobile network monitoring. Traditional rule-based and threshold-based approaches, while widely used, often struggle to adapt to dynamic network environments. Machine learning models, particularly those based on classification algorithms, have demonstrated improved accuracy in fault detection by identifying patterns in historical data. More recently, Long Short-Term Memory (LSTM) networks have gained attention due to their ability to process sequential data and capture temporal dependencies in network performance metrics, making them well-suited for detecting anomalies in time-series data.

Despite the effectiveness of deep learning models in anomaly detection, a key challenge remains: imbalanced datasets. In real-world RRU monitoring, normal operating conditions vastly outnumber instances of actual anomalies, making rare faults difficult to detect. Standard LSTM models trained on such datasets tend to favor the majority class, leading to low recall for minority-class anomalies. This bias severely limits the practical utility of anomaly detection systems, as critical but infrequent failures may go undetected, posing risks to network stability. Moreover, this study is constrained by the limited sample size in certain minority classes, which prevents the effective use of synthetic oversampling techniques such as SMOTE. As a result, resampling methods that avoid synthetic data generation were adopted to preserve data integrity while mitigating class imbalance.

Several techniques have been proposed to mitigate class imbalance in machine learning, including oversampling and undersampling methods. However, conventional synthetic oversampling techniques often generate artificial data that may not accurately represent real-world anomalies,

potentially introducing noise and leading to overfitting. An alternative approach involves balancing the dataset while preserving the original data distribution, allowing the model to learn more effectively from minority-class samples without distorting their characteristics.

This study aims to develop a robust LSTM-based anomaly detection framework designed to effectively monitor RRU operational stability under imbalanced data conditions. To achieve this, the proposed approach integrates a resampling strategy to ensure a more balanced class distribution, thereby enhancing the model's ability to detect anomalies in minority classes. To this end, the study specifically focuses on preprocessing and resampling imbalanced RRU operational data using the RandomOverSampler to balance the dataset without introducing synthetic noise, developing an LSTM-based model optimized for time-series anomaly detection that captures temporal dependencies in RRU voltage and temperature fluctuations, and evaluating the model's performance before and after resampling to assess the impact of balancing techniques on precision, recall, and F1-score.

2. Background

The rapid evolution of 4G/5G mobile networks has introduced new challenges in ensuring network reliability and efficient operation and maintenance (O&M) [1]. As mobile communication services become more critical, maintaining the performance of Radio Remote Units (RRUs) is essential to prevent service degradation and failures. Traditional reactive fault detection methods often fail to provide timely insights, leading to prolonged downtimes and reduced network efficiency [2]. The increasing complexity of large-scale distributed antenna systems further necessitates advanced fault detection mechanisms that can accurately identify network anomalies [3].

To enhance fault detection and anomaly prediction, machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques have gained attention due to their ability to process large volumes of network data and detect patterns that indicate potential failures [4]. Among these approaches, Long Short-Term Memory (LSTM) networks have demonstrated strong capabilities in analyzing time-series network data, enabling real-time failure prediction [5]. However, applying ML-based failure detection models in real-world network environments is challenging due to the class imbalance problem, where network failure events occur significantly less frequently than normal operational data [6].

Addressing class imbalance is crucial for improving the accuracy of ML models in network anomaly detection. Various techniques, such as undersampling, oversampling, and the Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE), have been proposed to improve model robustness in handling imbalanced datasets [7]. Additionally, the presence of class overlap further complicates the classification process, making it difficult for models to distinguish between normal and failure states [8].

To overcome these limitations, this study proposes an LSTM-based predictive maintenance framework tailored for 4G/5G network fault detection. By integrating advanced data preprocessing techniques and deep learning-based time-series analysis, this approach aims to enhance failure prediction accuracy, support proactive maintenance strategies, and contribute to the resilience of modern mobile communication networks [9].

3. Related Works

The increasing complexity of 5G networks has driven significant advancements in fault detection, resource management, and predictive analytics to maintain network stability and service reliability. Researchers have explored various approaches, including machine learning (ML), deep learning (DL), and artificial intelligence (AI)-based methods, to enhance fault prediction and network optimization. One of the key challenges in 5G network maintenance is radio link failure (RLF) prediction, which is influenced by multiple environmental factors. Several studies have demonstrated that integrating historical weather data and link parameters can improve the accuracy of failure predictions, allowing operators to anticipate and mitigate disruptions more effectively [10]. The impact of environmental conditions, including humidity, wind speed, and temperature fluctuations, has also been examined, revealing a strong correlation between adverse weather and increased radio link degradation [11]. These findings highlight the importance of real-time environmental monitoring in predictive network maintenance.

Advancements in ML-based fault prediction have further expanded the capabilities of network anomaly detection. Ensemble learning techniques have been studied extensively, demonstrating their effectiveness in enhancing fault detection accuracy in telecommunication networks [12]. Additionally, ML-based fault detection in large-scale distributed antenna systems has been explored through time-series similarity analysis, enabling early identification of system anomalies. A broader review of ML applications in heterogeneous telecommunication networks underscores the growing role of AI-driven methodologies in predictive maintenance [13].

Beyond traditional ML models, deep learning techniques, particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, have shown promise in optimizing 5G resource allocation. These models effectively process time-series data, capturing long-term dependencies to enhance network efficiency and reduce latency [14]. LSTM-based methods have also been applied in Quality of Service (QoS) prediction, particularly for connected and automated mobility (CAM) applications, ensuring proactive resource allocation under dynamic network conditions [15].

Further innovations in predictive analytics have emerged with the use of Graph Neural Networks (GNNs), which leverage spatiotemporal dependencies within network datasets to improve cellular Key Performance Indicator (KPI) prediction [16]. This approach has been found to enhance network performance forecasting, allowing for smarter and more adaptive network management strategies. One of the critical challenges in network fault prediction is the class imbalance problem, where failure events constitute only a small fraction of total network data. Addressing this issue, researchers

have explored various data resampling techniques, such as undersampling, oversampling, and Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE), to improve model accuracy in detecting rare faults [17]. Comparative studies have suggested that integrating sampling strategies with ensemble learning can significantly enhance prediction performance, ensuring a more balanced approach to network anomaly detection.

Among oversampling techniques, SMOTE [18] and ADASYN [19] have been widely adopted to generate synthetic samples and enhance class representation. SMOTE applies interpolation between existing minority-class samples, while ADASYN adaptively generates synthetic samples based on the distribution of difficult-to-classify instances. However, both methods require a sufficient number of minority-class instances to function effectively. Given the dataset constraints and specific requirements set by the vendor, these methods were not applicable in this study. Instead, RandomOverSampler was employed as a practical alternative to balance the dataset while ensuring compliance with vendor requirements and maintaining data integrity. This approach allowed the model to learn from a more evenly distributed dataset while avoiding potential biases introduced by synthetic sample generation.

Recent studies have demonstrated that despite its simplicity, RandomOverSampler (ROS) remains a robust method for handling imbalanced datasets, often achieving competitive accuracy compared to more advanced sampling techniques [20]. Unlike SMOTE and ADASYN, which generate synthetic samples, ROS preserves the original feature distribution by duplicating existing minority instances rather than synthesizing new data points. Given its computational efficiency and practical implementation benefits, ROS was chosen as the primary resampling technique in this study. This decision was further reinforced by vendor constraints, which restricted the introduction of synthetic data and required strict preservation of the original dataset structure.

Multiple Sampling Methods (MSM) have been introduced to handle class imbalance by integrating different resampling techniques, such as combining oversampling with undersampling to improve classifier performance. Previous studies have demonstrated that MSM-based approaches can enhance predictive accuracy in imbalanced datasets, particularly in network anomaly detection and fault prediction tasks [21]. However, these methods typically require careful tuning to prevent overfitting and may introduce synthetic data distributions that deviate from real-world conditions. In this study, RandomOverSampler was employed as the primary technique to address class imbalance, ensuring compliance with vendor constraints while maintaining the original data distribution. Although MSM-based approaches offer advantages in general cases, the dataset constraints in this study limited the feasibility of synthetic oversampling techniques, making RandomOverSampler the most suitable choice.

In addition to ML and deep learning approaches, recent studies have explored alarm log-based fault prediction models that utilize entropy-based layered analysis to predict hardware failures [22]. By analyzing historical alarm data, these models improve predictive maintenance capabilities, reducing downtime and enhancing overall network reliability. Furthermore, research in multi-scenario

KPI prediction has focused on deep learning-based optimizations, which help in improving network stability and fault recovery mechanisms [23].

The collective findings from these studies provide a strong foundation for developing advanced predictive maintenance frameworks that integrate LSTM-based fault detection, imbalanced data handling, and KPI-driven optimization. As 5 G networks continue to evolve, leveraging AI-driven methodologies will be essential for ensuring scalable, resilient, and self-optimizing telecommunication infrastructures.

4. Research Method

4.1 Data Preprocessing

4.1.1 Data Collection and Cleaning

The dataset used in this study consists of 5,000 samples of Remote Radio Unit (RRU) operational parameters, specifically voltage and temperature readings. The data were extracted from structured Excel files and underwent a thorough cleaning process to ensure reliability. Non-numeric entries and missing values were identified and removed. This preprocessing step ensured that the data were accurate, consistent, and suitable for subsequent analysis.

4.1.2 Label Assignment

Each sample in the dataset was categorized into one of four predefined classes, based on voltage and temperature thresholds:

- Normal (1): Voltage between 40–60 V and temperature between -25°C and 60°C.
- Abnormal Voltage (0.1): Voltage outside the acceptable range (40–60 V), while temperature remained within -25°C to 60°C.
- Abnormal Temperature (0.2): Voltage within the acceptable range (40–60 V), but temperature outside -25°C to 60°C.
- Both Abnormal (0): Both voltage and temperature outside their respective thresholds.

This labeling process ensured that critical RRU operational states were captured comprehensively. A significant class imbalance was observed, with the majority of samples labeled as Normal (1), while the other three categories were underrepresented.

4.1.3 Addressing Class Imbalance

Due to specific constraints set by the vendor, the implementation of synthetic oversampling techniques such as SMOTE and ADASYN was not feasible for this dataset. Instead, RandomOverSampler was employed to address class imbalance while ensuring compliance with vendor requirements. This approach maintains data integrity and avoids potential issues associated with synthetic sample generation.

The RandomOverSampler method was applied to duplicate instances of the underrepresented classes until a balanced class distribution was achieved. This ensured that all categories had sufficient representation during training. Unlike synthetic oversampling techniques, which generate artificial samples, RandomOverSampler preserves the original feature distribution by

using actual instances from the minority classes. This decision was supported by previous studies demonstrating that RandomOverSampler can enhance model robustness while maintaining computational efficiency.

The overall workflow of the proposed anomaly detection framework is illustrated in Fig. 1.

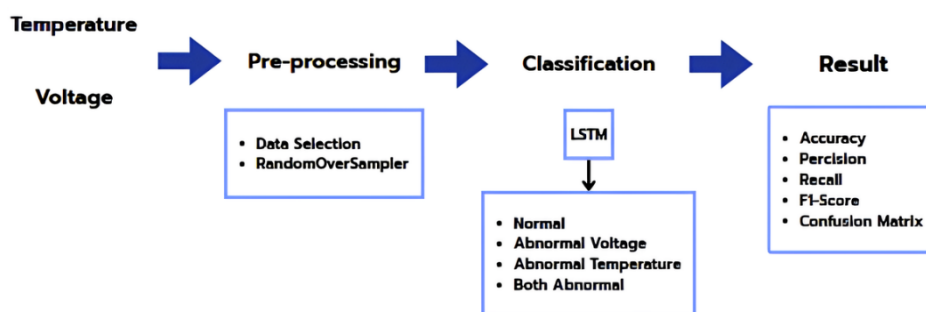


Fig. 1 Overview of the proposed RRU anomaly detection framework.

4.2 Model Development

4.2.1 Feature Scaling and Sequence Creation

Voltage and temperature values were normalized to a range of [0, 1] using Min-Max Scaling to standardize the features. This ensured that both features contributed equally during training and avoided bias toward one feature over the other. To capture temporal dependencies in the data, sequences of three consecutive time steps were generated for each sample. This sequence creation step allowed the model to learn patterns over time and improved its ability to detect anomalies.

A fixed sequence length of 3 timesteps was selected to balance model simplicity with computational efficiency. This window size allows the model to learn short-term temporal patterns without overfitting or incurring excessive training cost. Future work will explore longer sequence lengths to capture more extended temporal dependencies and enhance detection of delayed anomalies. Only two features voltage and temperature were used in this study. This selection was informed by domain knowledge shared by the vendor, which identified these parameters as the most frequent and critical indicators of RRU/AAU faults. Although this is a limited feature set, it reflects real-world operational focus. Future studies will consider additional KPIs, such as RSRP, SINR, and RSSI, to enhance predictive accuracy and generalizability.

4.2.2 LSTM Model Architecture

The model was designed using TensorFlow/Keras and featured a Long Short-Term Memory (LSTM) architecture optimized for time-series data. The key components of the model are as follows:

- Input Layer: Accepting sequences with a shape of (3, 2), corresponding to three time steps and two features (voltage and temperature).

- First LSTM Layer: 64 memory units with ReLU activation and return_sequences=True to pass the sequence to the next LSTM layer.

- Dropout Layer: A dropout rate of 30% to reduce overfitting.

- Second LSTM Layer: 32 memory units with ReLU activation.

- Second Dropout Layer: A dropout rate of 20% to further mitigate overfitting.

- Output Layer: A dense layer with softmax activation, producing probabilities for the four output classes.

The model was compiled using the Adam optimizer and categorical cross entropy as the loss function. This architecture was designed to balance performance and complexity while effectively capturing temporal patterns in the data.

The model was trained over 50 epochs using a batch size of 32. The learning process was monitored using a 20% validation split extracted from the training data. Class weights were incorporated to address residual class imbalance, computed using an inverse frequency strategy via scikit-learn's compute_class_weight function. These training hyperparameters and preprocessing steps are summarized in Table 1 to support reproducibility. These values were selected based on initial experiments to balance overfitting risk and training efficiency.

Table 1 Summary of model architecture and training parameters

Component	Parameter	Value
Input Shape	(timesteps x features)	3 timesteps, 2 features
LSTM Layer 1	Units	64 (ReLU)
Dropout Layer 1	Rate	0.30
LSTM Layer 2	Units	32 (ReLU)
Dropout Layer 2	Rate	0.20
Output Layer	Activation	Softmax (4 classes)
Optimizer	-	Adam
Loss Function	-	Categorical Crossentropy
Epochs	-	50
Batch Size	-	32
Validation Split	-	20% from training
Class Weighting	-	Inverse frequency (scikit-learn)

4.2.3 Training and Validation

The dataset was split into training and testing sets with an 80/20 ratio. The model was trained over 50 epochs with a batch size of 32, using a validation split of 20% to monitor performance during training. GPU acceleration was utilized to improve training efficiency. Additionally, class weights were applied during training to further balance the learning process and ensure that minority classes were adequately represented. Class weights were computed using the `compute_class_weight` function from the scikit-learn library, which applies an inverse-frequency strategy. This approach ensures that minority classes receive higher importance during training, thus reducing model bias toward overrepresented classes.

4.3 Performance Evaluation

4.3.1 Evaluation Metrics

The model's performance was evaluated using several standard metrics:

- Accuracy: The proportion of correctly predicted samples across all classes.
- Precision: The proportion of true positive predictions among all positive predictions for each class.
- Recall: The proportion of true positives among all actual positives for each class.
- F1-Score: The harmonic mean of precision and recall, providing a balanced performance measure.

4.3.2 Confusion Matrix and Classification Report

Confusion matrices were used to visualize classification performance, showing the number of correct and incorrect predictions for each class. Detailed classification reports provided insights into precision, recall, and F1-scores for individual classes, highlighting strengths and weaknesses in the model's predictions.

4.3.3 Comparison of Pre and Post Resampling Performance

The model's performance was compared before and after applying the `RandomOverSampler`. The initial training on the imbalanced dataset resulted in high overall accuracy (95%) but poor recall and F1-scores for minority classes. After resampling, the model achieved significant improvements, with precision, recall, and F1-scores for minority classes exceeding 99%, as shown in the results section. These improvements demonstrate the importance of addressing class imbalance for robust anomaly detection.

5. Results and Discussion

5.1 Performance Before Resampling

The confusion matrix before resampling Fig. 2 demonstrates that the model achieves high accuracy for the majority class (Normal), but fails to correctly classify minority classes (Abnormal Voltage and Abnormal Temperature). The significant misclassification of these rare events indicates the model's bias toward the dominant class, which is a common issue in imbalanced datasets.

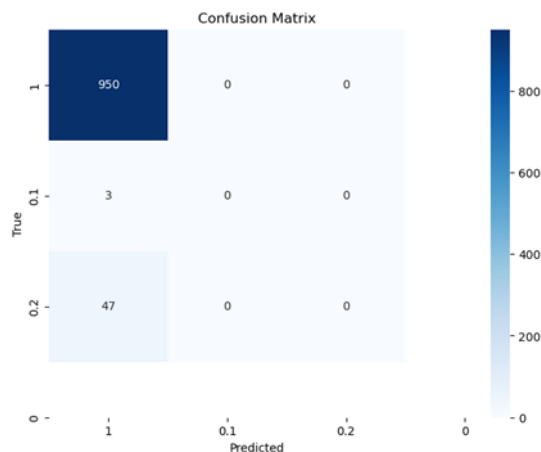


Fig. 2 The confusion matrix before resampling.

Such bias occurs because the model learns patterns predominantly from the majority class while failing to capture the characteristics of underrepresented categories. This results in low recall for minority classes, leading to a high rate of false negatives, where anomalies remain undetected. For real-world 4G/5G network monitoring, this is a serious issue because an undetected RRU fault could lead to signal degradation, service interruptions, or even complete network failure.

Table 2 The classification report before resampling.

	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.95	1.00	0.97	950
1	1.00	0.00	0.00	3
2	1.00	0.00	0.00	47
Accuracy			0.95	1000
Macro avg	0.98	0.33	0.32	1000
Weighted avg	0.95	0.95	0.93	1000

The classification report before resampling Table 2 highlights the imbalance problem. While the model achieves an overall accuracy of 95%, this metric alone is misleading because the recall for minority classes is near zero. This means that although the model correctly classifies most Normal cases, it fails to detect critical anomalies.

A recall value close to zero suggests that the model prioritizes accuracy for the majority class at the expense of identifying minority-class instances. In scenarios where anomaly detection is crucial such as predictive maintenance for RRU systems low recall for rare failures makes the model ineffective. Consequently, accuracy alone is not a sufficient measure of performance for imbalanced datasets. Instead, metrics such as recall and F1-score provide a more reliable evaluation.

Without addressing this imbalance, the model is not viable for deployment in real-world telecommunication networks, as it cannot reliably detect RRU failures that require immediate maintenance.

5.2 Impact of RandomOverSampler

The confusion matrix after applying the RandomOverSampler Fig. 3 shows a significant improvement in classification performance. Unlike Fig. 2, where minority classes were largely misclassified, the resampled dataset allows the model to learn a more balanced distribution, ensuring that all classes receive proper attention.

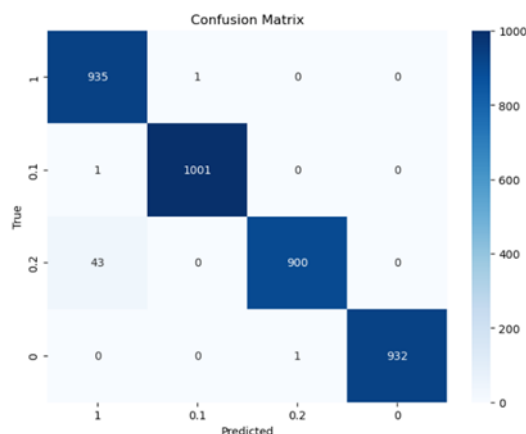


Fig. 3 The confusion matrix with oversampling.

Oversampling artificially increases the number of minority-class samples by duplicating existing instances, thereby preventing the model from being biased toward the majority class. This technique does not alter the fundamental characteristics of the dataset but ensures that the model receives sufficient exposure to all classes during training. As a result, it improves the model's ability to generalize across different class distributions, reducing the false-negative rate for anomaly detection.

Table 3 The classification report with oversampling.

	Precision	Recall	F1-Score	Support
0	0.96	1.00	0.97	936
1	1.00	1.00	1.00	1002
2	1.00	0.95	0.98	943
3	1.00	1.00	1.00	933
Accuracy			0.99	3814
Macro avg	0.99	0.99	0.99	3814
Weighted avg	0.99	0.99	0.99	3814

The classification report after oversampling Table 3 further demonstrates the effectiveness of addressing class imbalance. Precision, recall, and F1-scores for all classes have increased significantly, with recall values improving from near-zero to over 95%. This enhancement confirms that resampling plays a critical role in improving the reliability of anomaly detection in RRU systems.

By balancing the dataset, the model now correctly recognizes previously underrepresented classes, which is crucial for proactive network maintenance. With a higher recall rate, the model significantly reduces the likelihood of missing actual RRU failures, ensuring timely intervention and minimizing service disruptions. Another important observation is that precision remains high, meaning that the model does not overcompensate by misclassifying normal instances as anomalies. This balance between precision and recall is what makes the resampling technique effective.

5.3 Comparative Analysis

The comparative bar chart Fig. 4 provides a clear visualization of the improvements in model performance after applying the RandomOverSampler. The most notable improvements are in the recall and F1-score for minority classes, which increased from 33% and 32% to over 99%. Meanwhile, the overall accuracy improved from 95% to 99%.

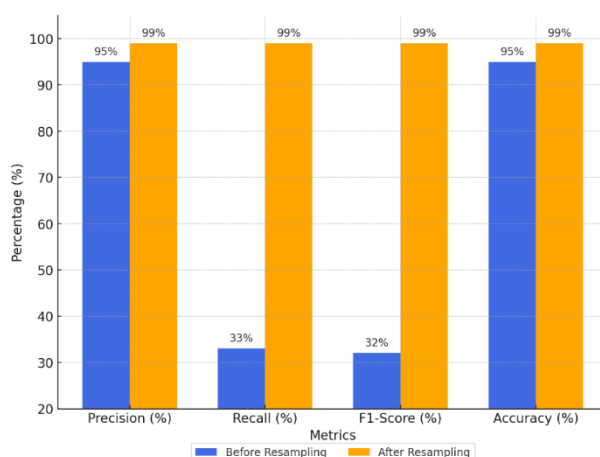


Fig. 4 Performance metrics before and after resampling.

These results confirm that resampling is crucial for achieving a well-balanced and effective anomaly detection system. However, while RandomOverSampler successfully addresses the class imbalance, it may introduce redundant samples in the dataset, potentially increasing training time.

5.4 Comparative Analysis

Improved Minority-Class Detection: By addressing class imbalance through RandomOverSampler, the model demonstrated significant improvements in detecting rare but critical anomalies, such as abnormal voltage and temperature conditions.

Maintained Generalization: The model preserved its generalization ability, achieving high accuracy and avoiding overfitting, even with the resampled dataset. **Applicability to Real-World Scenarios:** The proposed framework is highly applicable to real-world settings where imbalanced

data distributions are common, such as monitoring RRU systems in 4G/5G networks. The ability to reliably detect anomalies ensures improved network stability and reliability.

6. Conclusions

This study presents an LSTM-based framework for detecting anomalies in Remote Radio Units (RRUs) within 4G/5G networks, under imbalanced data conditions. The integration of RandomOverSampler significantly improved the model's ability to detect minority-class events, with recall and F1-score increasing from under 33% to over 99%. These results highlight the necessity of addressing data imbalance in real-world telecom applications.

However, this study has several limitations. In accordance with the Telco vendor's specifications, the model was trained using only two features: voltage and temperature. Although these parameters are relevant, they may not comprehensively capture all factors affecting RRU performance. Additionally, the use of a short 3-step sequence, though computationally efficient, may limit the model's ability to capture longer-term temporal patterns. Another key limitation is that the evaluation was conducted only on static, historical datasets; no real-time system testing or adaptation to concept drift was performed. There is also a potential risk of overfitting due to the small feature space and the use of oversampling.

Despite these limitations, the results demonstrate that the proposed framework is a strong candidate for anomaly detection in network monitoring scenarios. Nonetheless, further validation is essential before deployment, particularly under live network conditions where data dynamics can change unpredictably. Addressing these issues will be vital to ensure robust performance and generalizability.

7. Future Work

To enhance the applicability of this research in operational environments, several extensions are planned. First, we will expand the input feature set by incorporating additional RRU performance metrics, such as RSRP, SINR, and RSSI, to improve the model's predictive power. Second, we will experiment with longer sequence lengths to better capture temporal dependencies that may influence fault detection accuracy. Third, to assess generalization, the model will be tested on external datasets from different network environments. If consistent performance is observed, the framework will be integrated into a real-time monitoring prototype. This deployment will also explore challenges such as handling streaming input, retraining models periodically, and adapting to concept drift. These steps are essential to address the variability and dynamics in live 4G/5G networks.

Lastly, we will apply statistical significance tests, including confidence intervals and McNemar's test, to strengthen the reliability of the reported metrics and support comparative evaluations with baseline models such as SVM or Random Forest. These improvements aim to enhance the framework's robustness, scalability, and practical deployment potential.

8. Acknowledgement

This work was supported by Suranaree University of Technology and an Telco industry partner.

9. References

- [1] Y. F. Li, C. Jia, J. Ye, and B. Xu, "On the reliability of 4G/5G mobile telecommunication networks from the perspective of operation & maintenance," in *2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Orlando, United States, May 24-27, 2021, pp. 1-7.
- [2] J. M. de Oliveira Pereira, "A framework for 5G network data analytics function with emphasis on anomaly detection," M.S. thesis, Graduate Program in Computer Science, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2024.
- [3] Y. Wang, S. Meng, Y. Song, and D. Liu, "Fault detection for large scale indoor distributed antenna system based on time series similarity," in *2022 Prognostics and Health Management Conference (PHM-2022 London)*, London, United Kingdom, May 27-29, 2022, pp. 269-275.
- [4] S. Wang, J. F. Balarezo, S. Kandeepan, A. Al-Hourani, K. G. Chavez, and B. Rubinstein, "Machine learning in network anomaly detection: A survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 152379-152396, November. 2021.
- [5] K. Ghosh, C. Bellinger, R. Corizzo, P. Branco, B. Krawczyk, and N. Japkowicz, "The class imbalance problem in deep learning," *Machine Learning*, vol. 113, no. 7, pp. 4845-4901, December. 2022.
- [6] P. Vuttipittayamongkol, E. Elyan, and A. Petrovski, "On the class overlap problem in imbalanced data classification," *Knowledge-Based Systems*, vol. 212, January. 2021.
- [7] T. Wongvorachan, S. He, and O. Bulut, "A comparison of undersampling, oversampling, and SMOTE methods for dealing with imbalanced classification in educational data mining," *Information*, vol. 14, no. 1, January. 2023.
- [8] K. R. Balmuri, S. Konda, W.-C. Lai, P. B. Divakarachari, K. M. V. Gowda, and H. K. Lingappa, "A long short-term memory network-based radio resource management for 5G network," *Future Internet*, vol. 14, no. 6, June. 2022.
- [9] Y. Wei, J. Jang-Jaccard, W. Xu, F. Sabrina, S. Camtepe, and M. Boulic, "LSTM-autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 3787-3800, February. 2023.
- [10] S. Aktaş, H. Alemdar, and S. Ergüt, "Towards 5G and beyond radio link diagnosis: Radio link failure prediction by using historical weather, link parameters," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 99, April. 2022.

- [11] S. K. Agarwal, S. Banerjee, and R. Mahapatra, "Prediction and recovery of radio link failure caused by environmental factors," in *2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON)*, Kochi, India, November 24-26, 2022, pp. 1-6.
- [12] W. Zhang, Y. Li, M. Wen, and R. He, "Comparative study of ensemble learning methods in just-in-time software defect prediction," in *2023 IEEE 23rd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion (QRS-C)*, Chiang Mai, Thailand, October 22-26, 2023, pp. 83-92.
- [13] K. Murphy, A. Lavignotte, and C. Lepers, "Fault prediction for heterogeneous telecommunication networks using machine learning: a survey," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no. 2, pp. 2515-2538, April. 2024.
- [14] A. Pourmahboubi and H. Tabrizchi, "LSTM-based framework for 5G resource allocation prediction," in *2024 11th International Symposium on Telecommunications (IST)*, Tehran, Iran, October 9-10, 2024, pp. 295-302.
- [15] S. Barmpounakis, L. Magoula, N. Koursioupas, R. Khalili, J. M. Perdomo, and R. P. Manjunath, "LSTM-based QoS prediction for 5G-enabled connected and automated mobility applications," in *2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF)*, Montreal, Canada, October 13-15, 2021, pp. 436-440.
- [16] J. Lin, et al., "Multi-scenario cellular KPI prediction based on spatiotemporal graph neural network," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 22, pp. 5131-5142, June. 2024.
- [17] F. Nhita and I. Kurniawan, "Performance and statistical evaluation of three sampling approaches in handling binary imbalanced data sets," in *2023 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)*, Bandung, Indonesia, August 9-10, 2023, pp. 420-425.
- [18] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321-357, June. 2002.
- [19] H. He, Y. Bai, E. A. Garcia, and S. Li, "ADASYN: adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning," in *2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, Hong Kong, China, June 1-8, 2008, pp. 1322-1328.
- [20] F. Kamalov, H. H. Leung, and A. K. Cherukuri, "Keep it simple: random oversampling for imbalanced data," in *2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, Dubai, United Arab Emirates, February 20-23, 2023, pp. 1-4.
- [21] G. E. A. P. A. Batista, R. C. Prati, and M. C. Monard, "A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data," *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, vol. 6, no. 1, pp. 20-29, June. 2004.

- [22] A. Massaro, D. Kostadinov, A. Silva, A. O. Guzman, and A. Aghasaryan, "Predicting network hardware faults through layered treatment of alarms logs," *Entropy*, vol. 25, no. 6, June. 2023.
- [23] L. Sana, et al., "Securing the IoT cyber environment: Enhancing intrusion anomaly detection with vision transformers," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 82443-82468, May. 2024.

การประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกเพื่อลดหมอกควันในจังหวัดเชียงใหม่
Assessment of the Potential of Forage Maize Residues
as an Alternative Biomass Fuel for Mitigating Haze Pollution in Chiang Mai

จินตามณี ป็อกสอน^{1*}

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Chindamanee Pokson^{1*}

School of Renewable Energy, Maejo University

pokson.chindamanee@gmail.com

Received 2 June 2025

Revised 19 June 2025

Accepted 14 August 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลสำหรับระบบเผาไหม้ขนาดเล็ก (ไม่เกิน 50 kW) เปรียบเทียบกับการเผาไหม้ในทีโล่ง ซึ่งเป็นแนวทางดั้งเดิมที่นิยมดำเนินการในภาคการเกษตร ผลการศึกษาพบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ.2566-2567 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,159,316.84 ตัน โดยเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าประมาณ 731,910.66 ตัน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีพบว่า เศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ค่าความร้อนต่ำเฉลี่ยประมาณ 17.15 MJ/kg ส่งผลให้ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลด้านพลังงานความร้อน เท่ากับ 12,552,267.82 GJ ผลการประเมินสารมลพิษทางอากาศ พบว่า การนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดมลพิษได้ 31,387.55 ตัน หรือคิดเป็นปริมาณสารมลพิษที่ลดลงได้ 63.08% นอกจากนี้ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับชั้นปลายด้วยวิธี ReCiPe 2016 พบว่า ทางเลือกการนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ 2.43×10^{-6} DALY/kg และลดผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ 6.63×10^{-10} species-y/kg สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนเพื่อการลดการเผาในที่โล่ง

คำสำคัญ: วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์, เชื้อเพลิงชีวมวล, มลพิษทางอากาศ, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

This study aims to assess the potential of maize residues in Chiang Mai as an alternative biomass fuel for small-scale combustion systems (< 50 kW), as an alternative to conventional open-

field burning practices. The results indicate that the total amount of agricultural residues generated in Chiang Mai during the 2023–2024 cropping season was approximately 1,159,316.84 tons, of which maize residues accounted for 731,910.66 tonnes. Analysis of their thermal properties shows an average lower heating value for maize residues of approximately 17.15 MJ/kg. Based on this value, the estimated thermal energy potential from maize residues is approximately 12,552,267.82 GJ. In terms of air pollution, utilizing maize residues as biomass fuel could reduce air pollutant emissions by approximately 31,387.55 tons, representing a reduction of about 63.08% compared to open-field burning. Furthermore, the environmental impact assessment using the ReCiPe 2016 methodology indicates that using maize residues as biomass fuel could mitigate human health impacts by 2.43×10^{-6} DALY/kg and ecosystem impacts by 6.63×10^{-10} species-y/kg, relative to open-field burning. The findings reveal that maize residues possess significant potential for energy production and environmental impact mitigation, representing a sustainable alternative to open-field burning.

Keywords: Agricultural Residue, Maize, Biomass Fuel, Haze Pollution, Environmental Impact

1. บทนำ

จังหวัดเชียงใหม่และพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยประสบปัญหาหมอกควันและมลพิษทางอากาศอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในฤดูแล้ง (ช่วงเดือนมกราคม-เมษายน) ซึ่งจากข้อมูลปี พ.ศ.2567 พบว่าในช่วงเดือนเมษายน พื้นที่อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ มีความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร (Particulate Matter Less than 2.5 micrometers, PM_{2.5}) สูงถึง 224.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพตามเกณฑ์ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย [1] และด้วยลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดเชียงใหม่เป็นแอ่งที่ถูกล้อมรอบด้วยภูเขาสูง จึงส่งผลให้การระบายอากาศในแนวตั้งเป็นไปอย่างจำกัด และเอื้อต่อการสะสมของมลพิษทางอากาศในระดับพื้นดิน ซึ่งจากผลการบินสำรวจและเก็บข้อมูลคุณภาพอากาศในประเทศไทยเมื่อวันที่ 16-26 มีนาคม พ.ศ.2567 โดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) พบว่าการเผาชีวมวลในที่โล่ง (Open Biomass Burning) เป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นละอองในบรรยากาศ และมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดมลพิษในระดับภูมิภาค [2] สอดรับกับงานวิจัยของ Ponsawansong et al. [3] ซึ่งได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นร่วมกับแบบจำลองเชิงสถิติในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน พบว่า แหล่งที่ทำให้เกิดปริมาณฝุ่นมากที่สุดคือการเผาชีวมวล โดยคิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 57.9% ของแหล่งกำเนิดฝุ่นทั้งหมด และจากข้อมูลการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 [4] พบว่า ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีจำนวนรวมประมาณ 1,159,316.84 ตัน โดยวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมีสัดส่วนสูงสุดถึง 63% ของปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมด

เพื่อลดผลกระทบจากการเผาไหม้ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน อาทิ Ruggeri et al. [5] Pradeep et al. [6] และ Cortazar et al. [7] ซึ่งได้นำชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เศษซากพืชที่ประกอบด้วยวัสดุจากพืชที่ผ่านการแปรรูป เช่น ลำต้น ใบ และเปลือก เป็นต้น มักถูกนำมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นอาหารสัตว์ และใช้ในการผลิตเป็นพลังงาน ซึ่งแม้จะมีข้อจำกัดในการใช้ชีวมวลในอดีต แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้การเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานมีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น อาทิ ไฟฟ้า ความร้อน เชื้อเพลิงชีวภาพ และสารชีวเคมี โดยผ่านกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical) และชีวเคมี (Biochemical) ซึ่ง Zhu et al. [8] ได้ศึกษา

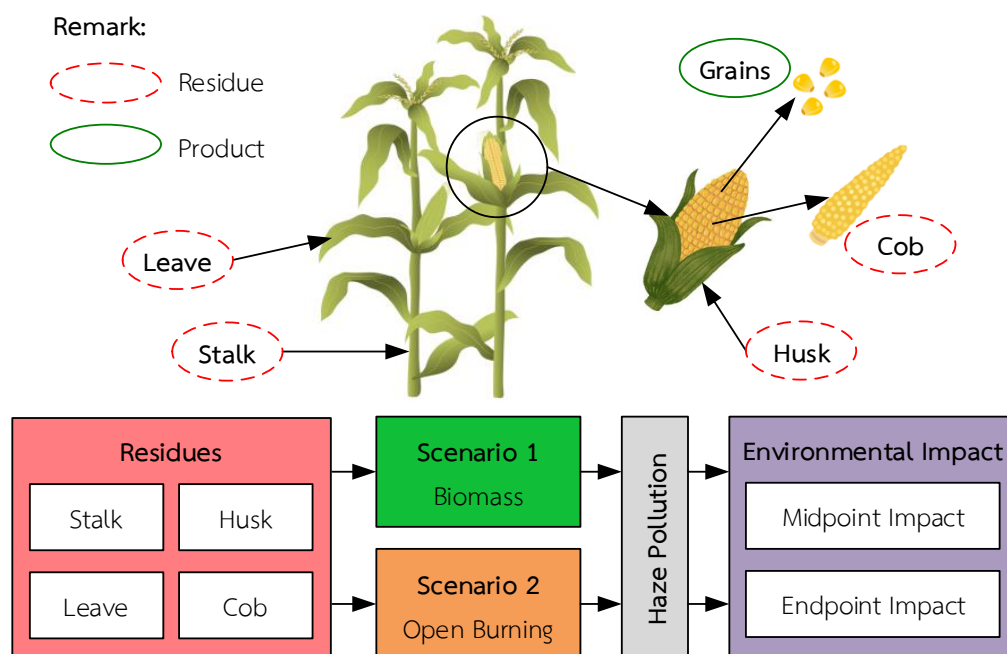
เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปชีวมวล 4 ประเภท ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุเหลือทิ้งภาคป่าไม้ มูลสัตว์ และเศษอาหารจากขยะชุมชน ให้เป็นพลังงาน โดยพิจารณาเทคโนโลยีกระบวนการทางชีวเคมีและทางเคมีความร้อน ผลการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีทางเคมีความร้อนให้ค่าพลังงาน 0.1-15.8 MJ/kg ขณะที่เทคโนโลยีทางชีวเคมีให้ค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1.0-12.7 MJ/kg โดยค่าพลังงานสูงสุดของกระบวนการทางเคมีความร้อน สูงกว่าทางชีวเคมี ประมาณ 3.1 MJ/kg หรือราว 24% สอดรับกับงานวิจัยของ Chen et al. [9] และ Siwal et al. [10] ได้กล่าวถึง เทคโนโลยีทางเคมีความร้อนเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและง่ายต่อการบริโภคเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงหรือเผาพร้อมกับถ่านหินเพื่อสร้างความร้อนและพลังงาน นอกจากการนำมาเผาไหม้โดยตรง ยังมีการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น การอัดแท่ง (Briquettes) การอัดเม็ด (Pellets) ทอรรีไฟเคชัน (Torrefaction) เป็นต้น โดย Nunes et al. [11] และ Chen et al. [12] รายงานว่าการอัดแท่งและอัดเม็ดเป็นกระบวนการเชิงกายภาพที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ ช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและการจัดเก็บ ขณะที่ Granado et al. [13] พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟเคชันนี้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 9-13 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่ผ่านกระบวนการ ในแง่ของผลด้านสิ่งแวดล้อม Kinyar และ Bothongo [14] ได้เปรียบเทียบผลกระทบของแหล่งพลังงานต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 µm (PM_{2.5}) ในสหราชอาณาจักร โดยพบว่าก๊าซธรรมชาติส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.25% และการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก 0.18% ต่อการใช้การที่เพิ่มขึ้น 1% ในขณะที่เชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.21% และการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สอดรับกับงานวิจัยของ Bilgili et al. [15] Ulucak [16] และ Sulaiman et al. [17] ที่ยืนยันว่าเชื้อเพลิงชีวมวลช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจก นอกจากนี้ Shen et al. [18] ยังได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลในการผลิตไฟฟ้าสามารถลดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฝุ่นละอองขนาดเล็ก

จากปัญหาและข้อค้นพบจากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงถึงศักยภาพและประสิทธิภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อผลิตพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการเผาในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางดั้งเดิมที่ยังคงเป็นที่นิยมในการเกษตร และการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ครอบคลุมการศึกษาปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยข้อมูลการปล่อยมลพิษจากกิจกรรมตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ (EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook) [19] ร่วมกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) ด้วยวิธี ReCiPe 2016 [20] ศึกษาชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งของการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่สามารถสนับสนุนการจัดการวัสดุเหลือทิ้งของภาคการเกษตรอย่างยั่งยืนต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Forage Maize Residues) ได้แก่ ลำต้น (Stalk) ใบ (Leaf) เปลือก (Husk) และซังข้าวโพด (Cob) จะถูกนำมาศึกษาภายใต้เงื่อนไข คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวล (Biomass) และการเผาในที่โล่ง (Open Burning) เพื่อประเมินการปลดปล่อยสารมลพิษในการอากาศ (Haze Pollution) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละสถานการณ์ตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับชั้นกลาง (Midpoint Impact) และระดับชั้นปลาย (Endpoint Impact) ตามกรอบการประเมินวัฏจักรชีวิต ด้วยวิธี ReCiPe 2016 โดยที่สารมลพิษที่สนใจศึกษาประกอบด้วย ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 µm (PM_{2.5}) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 µm (PM₁₀) ฝุ่นแขวนลอยรวม (Total Suspended Particles, TSP) คาร์บอนดำ (Black Carbon, BC) คาร์บอนมอนอกไซด์

(Carbon Monoxide, CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen Oxide, NO_x) สารอินทรีย์ระเหยที่ก่อให้เกิดโอโซน (Non-methane Volatile Organic Compounds, NMVOC) ซัลเฟอร์ออกไซด์ (Sulfur Oxide, SO_x) และแอมโมเนีย (Ammonia, NH₃)



รูปที่ 1 ขอบเขตงานวิจัย

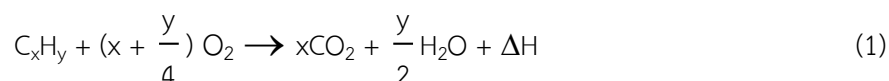
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

3.1 การเผาไหม้ของชีวมวล

การเผาไหม้ (Combustion) เป็นกระบวนการออกซิเดชันอย่างรวดเร็วขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง โดยเฉพาะคาร์บอนและไฮโดรเจนในสถานะที่มีออกซิเจน ซึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนและก๊าซต่าง ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไอน้ำ ผุ่นละออง และก๊าซมลพิษอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเผาไหม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสนใจศึกษากระบวนการเผาไหม้ 2 เงื่อนไข คือ (1) การใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลภายใต้ระบบควบคุม เช่น หม้อไอน้ำ เตาเผา เป็นต้น เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นพลังงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และ (2) การเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติทั่วไปในภาคเกษตรกรรม และมักเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์

การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Complete Combustion) เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์หลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ พร้อมทั้งปล่อยพลังงานความร้อนออกมา (Heat, ΔH) กระบวนการนี้พบได้ในระบบที่มีการควบคุม โดยสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป (C_xH_y) ดังแสดงในสมการที่ 1



การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือมีปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม หรือการถ่ายเทอากาศที่ไม่ดี ซึ่งกรณีนี้พบได้บ่อยในสถานการณ์การเผาในโรงโหล่งหรือการเผาที่ไม่ได้ควบคุม ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมลพิษ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ เขม่าคาร์บอน (C) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (Hydrocarbons, HCs) สามารถเขียนสมการการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ดังสมการที่ 2



3.2 ศักยภาพเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวล

ศักยภาพเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถประเมินได้จากมวลของชีวมวล (Mass of Biomass, $M_{Biomass}$) และค่าความร้อน (Heating Value) ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาใช้ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เพื่อแสดงถึงปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยไม่รวมพลังงานจากการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในงานศึกษาด้านพลังงาน สอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานจริงในระบบพลังงานความร้อนทั่วไป โดยเฉพาะระบบผลิตความร้อนขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ดังนั้น ศักยภาพพลังงานความร้อนจากชีวมวล (Heat Capacity of Biomass, $Q_{Biomass}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$Q_{Biomass} (MJ) = M_{Biomass} (kg) \cdot LHV_{Biomass} (MJ/kg) \quad (3)$$

3.3 การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้

การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ (Haze Pollutant Emission, E_p) สามารถประเมินได้จากอัตรากิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงเพื่อเผาไหม้ (Activity Rate, AR) ซึ่งหมายถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้หรือพลังงานที่ผลิตได้ ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยสารมลพิษ (Pollutant Emission Factor, EF_p) ดังแสดงในสมการที่ 4 เมื่อ p คือ ประเภทของสารมลพิษที่สนใจศึกษา และ i คือ ประเภทของกิจกรรมที่สนใจศึกษา

$$E_{i,p} (kg_p) = AR_i (Unit) \cdot EF_{ip} (kg_p/Unit) \quad (4)$$

การใช้เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงทดแทนประเภทชีวมวลภายใต้ระบบควบคุม พลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพในรูปของพลังงานความร้อนโดยตรง จึงสามารถอ้างอิงอัตรากิจกรรมด้วยค่าพลังงานความร้อนจากชีวมวล ($AR_{Biomass} = Q_{Biomass}$) ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษต่อหน่วยพลังงาน เพื่อประเมินสารมลพิษดังแสดงในสมการที่ 5

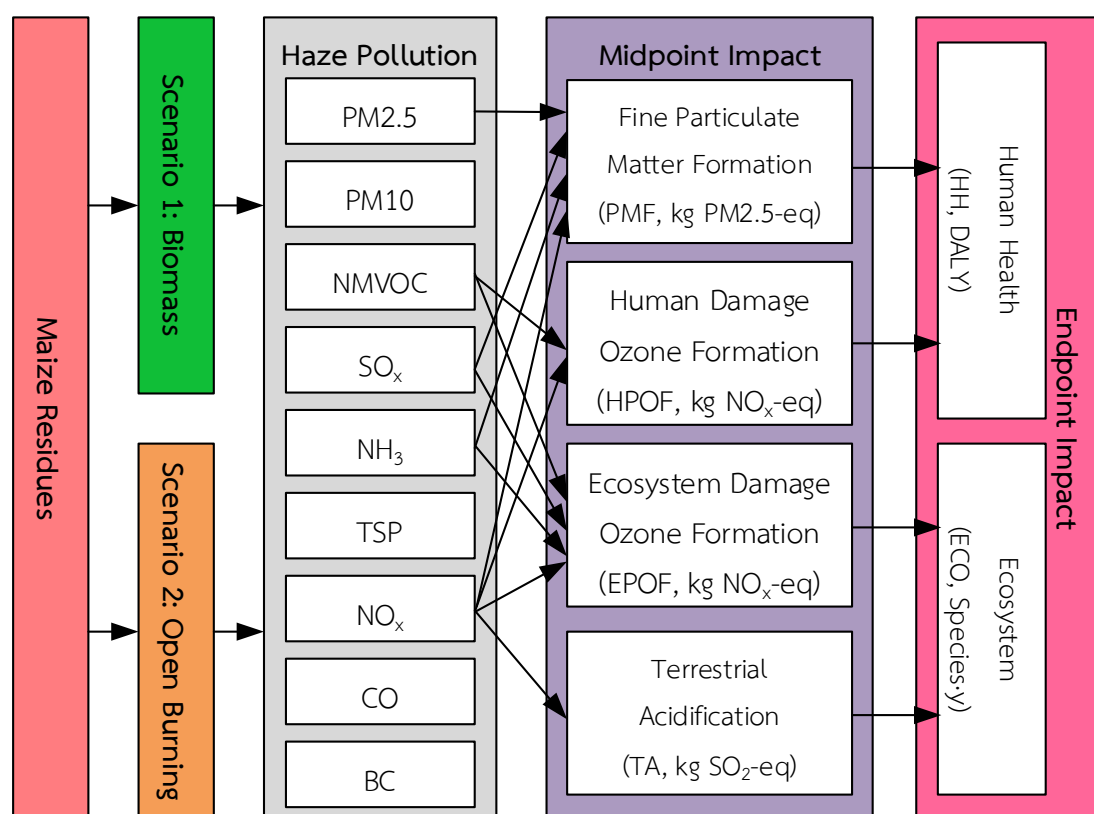
$$E_{Biomass,p} (kg_p) = Q_{Biomass} (GJ) \cdot EF_{Biomass,p} (kg_p/GJ) \quad (5)$$

ขณะที่การเผาในโรงโหล่งสามารถประเมินการปลดปล่อยมลพิษโดยอ้างอิงปริมาณหรือมวลของชีวมวลที่ถูกเผา ($AR_{OpenBurning} = M_{Biomass}$) และค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษต่อหน่วยมวลวัสดุชีวมวล ดังแสดงในสมการที่ 6

$$E_{OpenBurning,p} (kg_p) = M_{Biomass} (kg) \cdot EF_{OpenBurning,p} (kg_p/kg) \quad (6)$$

3.4 การวิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้หลักการประเมินตามแนวทางการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต ด้วยวิธี ReCiPe 2016 ประเมินผลกระทบในระดับชั้นกลาง (Midpoint) เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม และระดับชั้นปลาย (Endpoint) เพื่อบ่งชี้ผลกระทบสุดท้ายต่อมนุษย์และระบบนิเวศ ซึ่งมีแนวคิดดังแสดงในรูปที่ 2 สารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้ง 2 เจริญไข จะถูกจำแนก (Classification) ไปยังหมวดหมู่ผลกระทบที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินผลกระทบระดับชั้นกลาง ประกอบด้วย การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Fine Particulate Matter Formation, PMF) การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (Human Damage Ozone Formation, HPOF) การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (Ecosystem Damage Ozone Formation, EPOF) และความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial Acidification, TA) จากนั้นปริมาณของผลกระทบชั้นกลางจะถูกแปลงและถ่วงน้ำหนัก (Normalization and Weighting) เพื่อประเมินผลกระทบระดับชั้นปลาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (Human Health, HH) และผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Ecosystem, ECO)



รูปที่ 2 แนวคิดการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี ReCiPe 2016

ผลกระทบสิ่งแวดล้อมระดับชั้นกลาง (Characterized Value of Midpoint Impact, $CV_{m,p}$) สามารถประเมินได้โดยการนำปริมาณสารมลพิษ ($E_{i,p}$) ซึ่งจำแนกตามชนิดของมลพิษ p และแหล่งกำเนิด i มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบชั้นกลาง ($CF_{m,p,k}$) ของสารมลพิษ p ในหมวดหมู่ผลกระทบ k โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกรวบรวมเป็นค่าผลกระทบในหมวดหมู่นั้น ๆ ในหน่วยกิโลกรัมเทียบเท่าสารอ้างอิง (kg Emission-eq) เช่น หมวดหมู่ผลกระทบของการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) สามารถคำนวณได้จากการนำปริมาณสารมลพิษที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอนเมตร (PM2.5) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

แอมโมเนีย (NH_3) และไนโตรสออกไซด์ (NO_x) มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบ และรวมค่าทั้งหมดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ กิโลกรัมฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมครอนเทียบเท่า ($\text{kg PM}_{2.5}\text{-eq}$) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\text{CVM}_k (\text{kg Emission-eq}) = \sum (E_{i,p} [\text{kg}_p] \cdot \text{CF}_{m,pk} [\text{kg Emission-eq/kg}_p]) \quad (7)$$

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นปลาย (Characterized Value of Endpoint Impact, CVe_j) เป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการประเมินผลกระทบชั้นกลาง โดยนำค่าผลกระทบชั้นกลาง (CVM_k) ในแต่ละหมวดหมู่ผลกระทบ k มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบชั้นปลาย ($\text{CF}_{e,kj}$) ของหมวดหมู่ผลกระทบ k สู่ผลกระทบชั้นปลาย j โดยผลลัพธ์จะถูกนำเสนอในรูปของหน่วยที่สื่อถึงผลกระทบโดยตรง ประกอบด้วย ผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) แสดงในหน่วยจำนวนปีสุขภาพที่สูญเสียสุขภาพ (Disability Adjusted Life Years, DALY) และผลกระทบชั้นปลายต่อระบบนิเวศ (ECO) แสดงในหน่วยการความสูญเสียของความหลากหลายทางชีวภาพต่อปี (Species-y) เช่น ผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สามารถคำนวณได้จากการนำค่าผลกระทบชั้นกลาง ได้แก่ การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) และการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) มาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบ และรวมค่าทั้งหมดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน คือ ปีสุขภาพที่สูญเสียสุขภาพ (DALY) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 8

$$\text{CVe}_j (\text{Unit}) = \sum (\text{CVM}_k [\text{kg Emission-eq}] \cdot \text{CF}_{e,kj} [\text{Unit/kg Emission-eq}]) \quad (8)$$

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้ง

รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยอ้างอิงจากหน่วยงานภาครัฐหรือแหล่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อประเมินศักยภาพวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และวิเคราะห์อัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิต (Residue-to-Product Ratio, RPR) โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

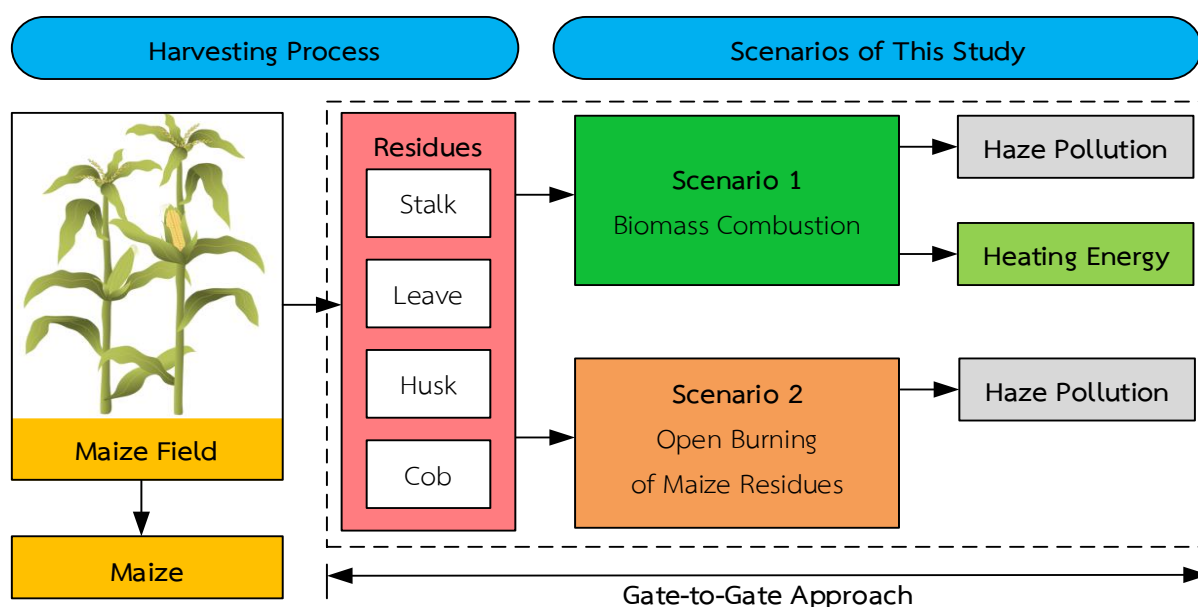
4.2 วิเคราะห์ผลด้านพลังงาน

รวบรวมข้อมูลคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีของวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ประกอบด้วย ค่าความชื้น องค์ประกอบธาตุหลัก (เช่น คาร์บอนและไนโตรเจน) ค่าความร้อนจำเพาะ และปริมาณเถ้า ซึ่งการวิเคราะห์จะดำเนินการโดยอ้างอิงจากข้อมูลเชิงวิชาการในวรรณกรรมและรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งของการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลผลิตพลังงานความร้อน

4.3 วิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ทำการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบเกต-ทู-เกต (Gate-to-Gate) ดังแสดงในรูปที่ 3 พิจารณาตั้งแต่วัสดุเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ถูกเผาไหม้ภายใต้ 2 เงื่อนไข คือ การใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในระบบเผาไหม้แบบควบคุม และการเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติดั้งเดิมตามวิถีชุมชนในบางพื้นที่ เพื่อกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยวผล

ผลผลิต โดยสารมลพิษที่ปลดปล่อยจากกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละเงื่อนไขจะถูกคำนวณโดยอ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยสารมลพิษ ตามแนวทางจัดทำบัญชีรายการปล่อยมลพิษทางอากาศ ของสำนักงานสิ่งแวดล้อมแห่งยุโรป [19] ซึ่งเป็นแนวทางมาตรฐานสากลในการจัดทำข้อมูลรายการมลพิษทางอากาศ โดยเงื่อนไขที่ 1 จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับระบบเผาไหม้ขนาดเล็ก (ไม่เกิน 50 kW) เพื่อผลิตพลังงานความร้อนในระดับชุมชนหรือระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมในลักษณะที่มีการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ [21] สำหรับเงื่อนไขที่ 2 จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษของการเผาในที่โล่งของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ [22] จากนั้นสารมลพิษทางอากาศที่ได้จากการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขจะถูกนำมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมในสองระดับ คือ ผลกระทบระดับชั้นกลางและผลกระทบระดับชั้นปลาย โดยใช้วิธีการประเมินผลกระทบแบบ ReCiPe 2016 [20] ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการแปลงข้อมูลการปลดปล่อยมลพิษเป็นค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปลงผลกระทบในแต่ละหมวดหมู่ โดยกำหนดหน่วยหน้าที่การทำงาน (Functional Unit) ของการศึกษาเท่ากับ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จำนวน 1 kg เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างสองเงื่อนไข



รูปที่ 3 ขอบเขตการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อม

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

5.1 รวบรวมข้อมูลพื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และเศษวัสดุเหลือทิ้ง

จากข้อมูลของสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่เกี่ยวกับการบริหารจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่า ในปี พ.ศ. 2566-2567 มีวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จำนวน 731,910.66 ตัน จากปริมาณผลผลิต 255,620 ตัน บนพื้นที่เพาะปลูกรวม 269,415 ไร่ เทียบเท่าผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 950 กิโลกรัมต่อไร่ [4] ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิตได้เท่ากับ 2.86:1 ใกล้เคียงกับรายงานการศึกษาโดย Supasri และ Sampattagul [23] ที่ได้ประเมินสถานการณ์การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่เมื่อปี พ.ศ. 2559 โดยพบว่า มีวัสดุเหลือทิ้งประมาณ 253,063 ตัน จากผลผลิต 121,665 ตัน หรือคิดเป็นอัตราส่วนวัสดุเหลือทิ้งต่อผลผลิตเท่ากับ 2.08:1 จากข้อมูลทั้งสองชุดจะเห็นว่า การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมากกว่า 2

เท่าของผลผลิตหลัก สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งในการนำไปใช้ประโยชน์ สอดรับเป้าหมายยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ในมิติการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะชีวมวลจากภาคเกษตร [24] ดังนั้นการจัดการปัญหาวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงควรดำเนินการภายใต้กลไกความร่วมมือแบบบูรณาการระหว่างหน่วยงานภาครัฐในระดับท้องถิ่น เช่น องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) และสำนักงานเกษตรจังหวัด ร่วมกับภาคเอกชนที่มีศักยภาพในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้ง เพื่อพัฒนาให้เกิดระบบบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่ต้นทาง (แหล่งผลิต) จนถึงปลายทาง (การใช้ประโยชน์) อันจะนำไปสู่เกษตรกรรมที่ยั่งยืนในระดับจังหวัดอย่างเป็นรูปธรรม

5.2 วิเคราะห์ผลด้านพลังงาน

จากข้อมูลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) ภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างประเทศในเอเชีย เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานจากไม้และชีวมวลอย่างยั่งยืน [25] ได้มีการรายงานงานขององค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนของลำต้นและใบเป็นองค์ประกอบหลักที่มีสัดส่วนของวัสดุเหลือทิ้งมากที่สุด ด้านค่าความชื้น (Moisture Content, MC) พบว่า ลำต้นและใบมีความชื้นสูงที่สุด ขณะที่ข้าวโพดมีค่าความชื้นต่ำกว่าส่วนอื่นอย่างชัดเจน ในด้านองค์ประกอบทางเคมีพบว่า วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีสัดส่วนของคาร์บอน (Carbon, C) เฉลี่ยที่ 45.12% และสัดส่วนของไนโตรเจน (Nitrogen, N) เฉลี่ยที่ 8.55% ซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากมีสัดส่วนคาร์บอนสูงกว่าไนโตรเจน เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำพบว่ามีความเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17.15 MJ/kg ใกล้เคียงกับค่าความร้อนของชีวมวลทั่วไป เช่น ฟางข้าว (14–17 MJ/kg) กากอ้อยและใบอ้อย (10–18 MJ/kg) เป็นต้น ซึ่งจากข้อมูลเชิงปริมาณพบว่า วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณสูงมาก เมื่อเทียบกับชีวมวลจากพืชชนิดอื่น โดยคิดเป็นสัดส่วนถึง 68% ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งหมดในพื้นที่ [4] จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง ทั้งในเชิงปริมาณและคุณลักษณะทางพลังงาน ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณเถ้า (Ash Content) เฉลี่ยของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ที่ประมาณ 7.68% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น เช่น ฟางข้าว มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 10–25% เป็นต้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีความร้อน [25]

ประเภท	สัดส่วน (RPR, %)	ความชื้น (MC, %)	คาร์บอน (C, %)	ไนโตรเจน (N, %)	ค่าความร้อน (LHV, MJ/kg)	เถ้า (Ash, %)
ลำต้นและใบ	1.00-2.50	11.50-22.00	47.09	0.81	19.66	5.77-14.20
ชัง	0.20-1.80	7.00-8.60	43.14	16.28	14.64-16.28	2.40-13.8
เปลือก	0.20-1.00	11.11	n/a	n/a	n/a	1.15
ค่าต่ำสุด		7.00	43.14	0.81	14.64	1.15
ค่าสูงสุด		22.00	47.09	16.28	19.66	14.20
ค่าเฉลี่ย		14.50	45.12	8.55	17.15	7.68

หมายเหตุ: n/a คือ ไม่ปรากฏการรายงานข้อมูล

จากข้อมูลองค์ประกอบทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี พบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการแปรรูปทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีความพร้อมสูง ทั้งในด้านการดำเนินการและการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับ

ชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เนื่องจากมีต้นทุนเริ่มต้นต่ำ ติดตั้งและใช้งานได้ง่าย อีกทั้งสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพวัสดุที่ซับซ้อน ซึ่งจากข้อมูลเชิงปริมาณของชีวมวลเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในจังหวัดเชียงใหม่ ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 พบว่า เศษวัสดุเหลือทิ้งหรือปริมาณชีวมวล (M_{Biomass}) จำนวน 731,910.66 ตัน (731,910,660 kg) เมื่อคูณกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) เท่ากับ 17.15 MJ/kg จะได้ศักยภาพพลังงานความร้อนรวมจากชีวมวล (Q_{Biomass}) เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และเมื่อพิจารณาร่วมกับบริบทเชิงนโยบายด้านพลังงานของประเทศและมาตรการส่งเสริมจากภาครัฐในปัจจุบัน ซึ่งมุ่งเน้นการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อเสริมความมั่นคงด้านพลังงานในระดับท้องถิ่น [26] เทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

5.3 วิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

ผลการประเมินศักยภาพพลังงานความร้อนรวมของชีวมวล เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เท่ากับ 731,910.66 ตัน จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษจากการเผาไหม้ ภายใต้สองเงื่อนไข ได้แก่ (1) การใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ขนาดเล็กที่มีการควบคุมการเผาไหม้ เช่น ในระดับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อม และ (2) การเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นแนวทางปฏิบัติทั่วไปของเกษตรกรบางพื้นที่ เพื่อกำจัดเศษวัสดุหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ผลการประเมินปริมาณสารมลพิษดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ขนาดเล็กที่มีการควบคุม สามารถลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้อย่างชัดเจน โดยมีมวลรวมของสารมลพิษเท่ากับ 18,367.73 ตัน ขณะที่กรณีการเผาไหม้ในที่โล่งปลดปล่อยมลพิษรวม 49,755.29 ตัน ส่งผลให้สามารถลดปริมาณการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้ 31,387.55 ตัน คิดเป็นอัตราการลดลง 63.08% เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ในที่โล่ง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งด้วยการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ที่มีการควบคุม มีศักยภาพในการลดมลพิษทางอากาศได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังพบว่า สารมลพิษประเภทแอมโมเนียลดลงได้มากที่สุด โดยคิดเป็นสัดส่วนการลดลงเท่ากับ 99.29% เมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง เนื่องจากการเผาไหม้ภายใต้ระบบควบคุมสามารถรักษาอุณหภูมิและอัตราการจ่ายอากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจนแทนการเกิดแอมโมเนีย ในขณะที่การเผาไหม้ในที่โล่งซึ่งปราศจากการควบคุมเงื่อนไขสำคัญ เช่น อุณหภูมิและออกซิเจน จึงก่อให้เกิดสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้มีการปลดปล่อยแอมโมเนียในปริมาณสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bray et al. [27] พบว่า การเผาไหม้ชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์เป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยแอมโมเนีย นอกจากนี้ผลการประเมินยังชี้ให้เห็นว่าสารมลพิษประเภทคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 μm (PM10) ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm (PM2.5) คาร์บอนดำ (BC) ฝุ่นแขวนลอยรวม (TSP) มีปริมาณการปลดปล่อยลดลงมากกว่า 50% ของปริมาณที่เกิดจากการเผาในที่โล่ง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ช่วยลดการก่อตัวและการปลดปล่อยสารมลพิษทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ปริมาณสารมลพิษทางอากาศ

ประเภทสารมลพิษ	สารมลพิษ (ตัน)			มลพิษที่ลดลง เทียบกับการเผา ในที่โล่ง (%)
	สถานการณ์ 1 เชื้อเพลิงชีวมวล	สถานการณ์ 2 เผาไหม้ในที่โล่ง	ผลต่าง	
แอมโมเนีย (NH_3)	12.55	1,756.59	1,744.03	99.29
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	7,154.79	28,398.13	21,243.34	74.81
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 μm (PM10)	2,046.02	4,537.85	2,491.83	54.91
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm (PM2.5)	2,008.36	4,391.46	2,383.10	54.27

ประเภทสารมลพิษ	สารมลพิษ (ตัน)			มลพิษที่ลดลง เทียบกับการเผา ในที่โล่ง (%)
	สถานการณ์ 1 เชื้อเพลิงชีวมวล	สถานการณ์ 2 เผาไหม้ในที่โล่ง	ผลต่าง	
คาร์บอนดำ (BC)	562.34	1,229.61	667.27	54.27
ฝุ่นแขวนลอยรวม (TSP)	2,133.89	4,611.04	2,477.15	53.72
ไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	1,142.26	1,317.44	175.18	13.30
สารอินทรีย์ระเหยที่ก่อให้เกิดโอโซน (NMVOC)	3,169.45	3,366.79	197.34	5.86
ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO _x)	138.07	146.38	8.31	5.68
รวมทั้งหมด	18,367.73	49,755.29	31,387.55	63.08

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการเผาไหม้ในที่โล่งต่อหน่วยพื้นที่การทำงาน (ต่อ 1 kg ของวัสดุเหลือทิ้ง) เพื่อเปรียบเทียบการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดบนฐานที่เทียบเคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแนวทางดังกล่าวสามารถลดการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) เท่ากับ 3.86×10^{-3} kg PM2.5-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) เท่ากับ 2.88×10^{-4} kg NO_x-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (EPOF) เท่ากับ 5.00×10^{-3} kg NO_x-eq/kg และลดความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA) เท่ากับ 8.62×10^{-5} kg NO_x-eq/kg โดยคิดเป็นการลดผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) เท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg และการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศ (ECO) เท่ากับ 6.63×10^{-10} Species-y/kg ซึ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้ในที่โล่ง นอกจากนี้ เมื่อดำเนินการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์โดยแปลงค่าผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์เป็นต้นทุนทางเศรษฐกิจ (Monetary Valuation) โดยใช้หลักเกณฑ์ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของนโยบายหรือมาตรการด้านสุขภาพ ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization – Choosing Interventions that are Cost Effective, WHO-CHOICE) ซึ่งเสนอให้ใช้ค่าเทียบเท่า 3 เท่าของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศต่อหัวประชากร (GDP per Capital) ต่อ 1 DALY เป็นเกณฑ์ในการประเมินความคุ้มค่าของนโยบายด้านสุขภาพ [28] ซึ่งในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศต่อหัวประชากร เท่ากับ 7,496 USD หรือประมาณ 254,264.32 บาท [29] ดังนั้นมูลค่าทางเศรษฐกิจของ 1 DALY คิดเป็น 762,792.96 บาท เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพที่ลดลงจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg จะเทียบเท่ากับมูลค่าความเสียหายที่สามารถหลีกเลี่ยงได้ประมาณ 3.28 บาทต่อกิโลกรัมของวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งสะท้อนถึงต้นทุนทางสุขภาพที่สามารถลดลงผ่านการจัดการชีวมวลอย่างยั่งยืน

แม้ว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวมวลจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพด้านพลังงานและความสามารถในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการเผาในที่โล่ง แต่ในทางปฏิบัติกลับพบว่าการประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าวยังไม่แพร่หลายในระดับพื้นที่ เนื่องจากอุปสรรคและข้อจำกัดหลายประการทั้งในเชิงโครงสร้าง เศรษฐกิจ และนโยบาย อาทิ ข้อจำกัดด้านการเก็บรวบรวมและขนส่ง เนื่องจากการกระจายตัวตามพื้นที่การเพาะปลูก การขาดแรงจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากไม่มีระบบสนับสนุนราคาหรือเงินอุดหนุนให้กับผู้ผลิตหรือผู้ใช้ชีวมวล รวมถึงความรู้ ความเข้าใจและการมีส่วนร่วมของเกษตรกรและชุมชน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างเป็นรูปธรรม จำเป็นต้องมีการดำเนินการในระดับนโยบายอย่างบูรณาการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดำเนินงานให้สอดคล้องกับ

ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) ในมิติการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [24] และ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน [30] ซึ่งแนวทางที่ควรได้รับการส่งเสริมในเชิงนโยบาย ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน สำหรับการจับเก็บ แปรรูป และขนส่งชีวมวลในระดับท้องถิ่น การส่งเสริมแรงจูงใจทางเศรษฐกิจโดยอุดหนุนราคาหรือภาษี สนับสนุนสำหรับการใช้พลังงานชีวมวล การพัฒนาองค์ความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยี บูรณาการนโยบายพลังงานและสิ่งแวดล้อม เพื่อสร้างระบบการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

ตารางที่ 3 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ลดลงต่อหน่วยเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 1 kg

ผลกระทบชั้นกลาง		ผลกระทบชั้นปลาย	
		ผลกระทบต่อสุขภาพ อนามัยของมนุษย์ (HH, DALY)	ผลกระทบต่อ ระบบนิเวศ (ECO, Species-y)
การก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF, kg PM _{2.5} -eq)	3.86×10^{-3}	2.43×10^{-6}	0
การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อ สุขภาพมนุษย์ (HPOF, kg NO _x -eq)	2.88×10^{-4}	2.62×10^{-10}	0
การก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อ ระบบนิเวศ (EPOF, kg NO _x -eq)	5.00×10^{-3}	0	6.45×10^{-10}
ความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA, kg SO _x -eq)	8.62×10^{-5}	0	1.83×10^{-11}
รวมขนาดผลกระทบ	9.23×10^{-3}	2.43×10^{-6}	6.63×10^{-10}

6. สรุป

ผลการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกเพื่อลดหมอกควัน ในจังหวัดเชียงใหม่ เปรียบเทียบระหว่างการนำวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบที่มีการควบคุม กับการเผาไหม้ในที่โล่ง ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติดั้งเดิมของเกษตรกร มีผลลัพธ์ที่สำคัญดังนี้

- เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดเชียงใหม่ในปีการผลิต พ.ศ. 2566-2567 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,159,316.84 ตัน โดยเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีเท่ากับ 731,910.66 ตัน คิดเป็น 63% ของปริมาณรวมของเศษวัสดุเหลือทิ้ง
- เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลด้านพลังงานความร้อน เท่ากับ 12,552,267.82 GJ และมีค่าความร้อนต่ำ ประมาณ 17.15 MJ/kg
- มวลรวมของมลพิษที่เกิดจากการนำเศษข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เท่ากับ 18,367.73 ตัน ขณะที่การเผาในที่โล่งมีมวลรวมมลพิษ เท่ากับ 49,755.29 ตัน คิดเป็นมลพิษทางอากาศที่สามารถลดลงได้เท่ากับ 31,387.55 ตัน หรือสัดส่วนของมลพิษที่สามารถลดลงได้ เท่ากับ 63.08%
- ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง สามารถลดการก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMF) เท่ากับ 3.86×10^{-3} kg PM_{2.5}-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อสุขภาพมนุษย์ (HPOF) เท่ากับ 2.88×10^{-4} kg NO_x-eq/kg ลดการก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดินที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ (EPOF) เท่ากับ 5.00×10^{-3} kg NO_x-eq/kg และลดความเป็นกรดต่อระบบนิเวศบนบก (TA) เท่ากับ 8.62×10^{-5} kg NO_x-eq/kg

- ผลกระทบชั้นปลาย สามารถลดผลกระทบชั้นปลายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ (HH) เท่ากับ 2.43×10^{-6} DALY/kg และการลดผลกระทบต่อระบบนิเวศ (ECO) เท่ากับ 6.63×10^{-10} Species-y/kg

7. ข้อเสนอแนะ

แม้การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบเผาไหม้ที่มีการควบคุมจะสามารถลดมลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมีความครอบคลุมและสะท้อนความเป็นจริงของระบบ ควรมีการศึกษาผลกระทบเพิ่มเติมในประเด็นการจัดการเศษวัสดุชีวมวลในระดับห่วงโซ่อุปทาน เช่น ขั้นตอนการเก็บรวบรวม การแปรรูปเบื้องต้น การขนส่ง รวมถึงการแปรรูปเป็นพลังงาน เป็นต้น เพื่อรายงานผลกระทบได้ในทุกระบวนการของระบบ นอกจากนี้ควรศึกษาวิจัยในมิติด้านนโยบาย เพื่อวิเคราะห์กรอบกฎหมาย มาตรการจูงใจทางเศรษฐศาสตร์ และบทบาทของภาครัฐในแต่ละระดับที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อเสนอแนวทางเชิงนโยบายที่เอื้อต่อการขยายผลและประยุกต์ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในระดับพื้นที่อย่างยั่งยืน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการจัดทำข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดในรายงานข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลสำคัญที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในงานวิจัยฉบับนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ, “ข้อมูลย้อนหลัง (รายปี): สถานการณ์หมอกควัน (ภาคเหนือ) ปี พ.ศ. 2567,” Air4Thai: ระบบรายงานคุณภาพอากาศประเทศไทย [ออนไลน์]. Available: <http://air4thai.pcd.go.th/webV3/#/History> (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [2] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), “ASIA-AQ บินเก็บคุณภาพอากาศ..เติมเต็มข้อมูล-ตอบโจทย์แหล่งที่มา PM 2.5,” [ออนไลน์]. Available: https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=8474&lang=EN (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [3] P. Ponsawansong et al., “Sources of PM_{2.5} oxidative potential during haze and non-haze seasons in Chiang Mai, Thailand,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 23, no. 10, pp. 1-17, October, 2023.
- [4] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดเชียงใหม่, “ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดเชียงใหม่,” [ออนไลน์]. Available: https://www.opsmoac.go.th/chiangmai-dwl-files-461691791926?utm_source=chatgpt.com (เข้าถึงเมื่อ: 28 พฤษภาคม 2568).
- [5] G. Ruggeri, C. Mazzocchi, E. De Marchi, A. Banterle, and G. Sali, “Provincial assessment of agricultural biomass residues for renewable energy in Italy,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 2946–2957, June, 2025.
- [6] M. Pradeep, N. L. Panwar, and N. Divyangkumar, “Torrefaction of agricultural biomass: A state-of-the-art review on transforming waste into clean energy,” *Energy 360*, vol. 3, pp. 1-17, June, 2025.

- [7] M. Cortazar et al., “A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification,” *Energy Conversion and Management*, vol. 276, pp.1-36, January, 2023.
- [8] J. Zhu, X. Fei, and K. Yin, “Assessment of waste-to-energy conversion technologies for biomass waste under different shared socioeconomic pathways,” *Energy & Environmental Sustainability*, vol. 1, no. 2, pp. 1-10, June, 2025.
- [9] W. H. Chen et al., “Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 82, pp. 1-34, January, 2021.
- [10] S. S. Siwal, K. Sheoran, A. K. Saini, D. V. N. Vo, Q. Wang, and V. K. Thakur, “Advanced thermochemical conversion technologies used for energy generation: Advancement and prospects,” *Fuel*, vol. 321, August, 2022.
- [11] L. J. Nunes, J. C. D. O. Matias, and J. P. D. S. Catalão, *Torrefaction of biomass for energy applications: from fundamentals to industrial scale*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press, 2017.
- [12] W. H. Chen, J. Peng, X. T. Bi, “A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 847-866, April, 2015.
- [13] M. P. P. Granado, A. M. T. Gadelha, D. S. Rodrigues, G. C. Antonio, and A. C. De Conti, “Effect of torrefaction on the properties of briquettes produced from agricultural waste,” *Bioresource Technology Reports*, vol. 21, February, 2023.
- [14] A. Kinyar and K. Bothongo, “The impact of natural gas, biomass, and energy from waste on CO₂ and PM_{2.5} emissions in the UK: Does eco-innovation matter?,” *Renewable Energy*, vol. 249, August, 2025.
- [15] F. Bilgili, E. Koçak, Ü. Bulut, and S. Kuşkaya, “Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 830–845, May, 2017.
- [16] R. Ulucak, “Linking biomass energy and CO₂ emissions in China using dynamic Autoregressive-Distributed Lag simulations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 250, March, 2020.
- [17] C. Sulaiman, A. S. Abdul-Rahim, and C. A. Ofozor, “Does wood biomass energy use reduce CO₂ emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, April, 2020.
- [18] Y. Shen, S. Sun, S. Yun, and L. Huang, “Impacts of biomass power generation on ambient air quality–evidence from China,” *Applied Economics Letters*, vol. 31, no. 16, pp. 1494–1498, March, 2024.
- [19] European Environment Agency (EEA), “*EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023> (Accessed: May. 25, 2025).

- [20] M. A. J. Huijbregts et al., “ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization.” [Online]. Available: https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Report%20ReCiPe_Update_20171002_0.pdf (Accessed: May. 25, 2025).
- [21] European Environment Agency (EEA), “1.A.4 Small combustion.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion-2023/view> (Accessed: May. 25, 2025).
- [22] European Environment Agency (EEA), “3.F Field burning of agricultural residues.” [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/3-agriculture/3-f-field-burning-of/view> (Accessed: May. 25, 2025).
- [23] T. Supasri and S. Sampattagul, “Attributional and consequential life cycle assessment for biomass energy production from maize cob in Chiang Dao district,” *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 11–19, January-April, 2019.
- [24] สำนักงานเลขาธิการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ และสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, “ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580,” [ออนไลน์]. Available: https://www.nesdc.go.th/download/document/SAC/NS_SumPlanOct2018.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 16 กรกฎาคม 2568).
- [25] A. Koopmans and J. Koppejan, “Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability.” [Online]. Available: <https://www.fao.org/4/ad576e/ad576e00.pdf> (Accessed: May. 20, 2025).
- [26] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, “แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580,” [ออนไลน์]. Available: https://www.eppo.go.th/images/Information_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 29 พฤษภาคม 2568).
- [27] C. D. Bray, W. Battye, V. P. Aneja, D. Q. Tong, P. Lee, and Y. Tang, “Ammonia emissions from biomass burning in the continental United States,” *Atmospheric Environment*, vol. 187, pp. 50–61, August, 2018.
- [28] R. Daroudi, A. A. Sari, A. Nahvijou, and A. Faramarzi, “Cost per DALY averted in low, middle- and high-income countries: evidence from the global burden of disease study to estimate the cost-effectiveness thresholds,” *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, vol. 19, no. 7, February, 2021.
- [29] Thailand Board of Investment, “Macroeconomics: Facts about Thailand.” [Online]. Available: <https://www.boi.go.th/index.php?page=macroeconomics> (Accessed: July. 2, 2025).
- [30] สภาพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, “ร่างแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13,” [ออนไลน์]. Available: https://www.nesdc.go.th/download/Plan13/Doc/Plan13_DraftFinal.pdf (เข้าถึงเมื่อ: 2 กรกฎาคม 2568).

Design and Simulation of a Guidance Control System for a 2.75-inch Rocket Using Pole Placement and PI Control

Nathawat Chaikam¹, Prasatporn Wongkamchang^{2*} and Prayoon Kunyoo³

^{1,3}Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Department of Mechanical Engineering, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

prasatporn_w@rtaf.mi.th

Received 03 March 2025

Revised 27 May 2025

Accepted 17 August 2025

Abstract

This research focuses on the design and simulation of an autopilot system for a 2.75-inch Wrap-Around Fin Aerial Rocket (WAFAR), incorporating a guidance system into the traditional unguided airframe. The control system was designed using a combination of pole placement techniques and proportional-integral (PI) control to enable precise directional control and maintain stability during flight. The design process takes into account the dynamics and aerodynamic characteristics of the rocket. The pole placement technique was employed to define the pole locations in the system's transfer function, achieving the desired stability and response characteristics. Concurrently, the PI control enhances the system's responsiveness and tracking accuracy. The guidance of the rocket is achieved through acceleration control, enabling it to follow the desired trajectory. A nonlinear simulation of the rocket under different launch-to-target distances and LOS errors demonstrates the effectiveness and accuracy of the proposed control system in target tracking. Although the control system was designed based on a linearized model of the rocket dynamics, it was evaluated on a nonlinear plant model to verify its practical performance.

Keywords: Guidance Control, Pole Placement, PI Control, 2.75-inch Rocket

1. Introduction

Continuous advancement of military weapon capabilities is essential. The 2.75-inch rocket is a widely used military weapon due to its ease of installation and straightforward operation. However, its accuracy in actual operations heavily relies on the pilot's skill, and errors can occur when engaging moving targets. This limitation arises because the rocket lacks the ability to adjust its trajectory once launched. Therefore, integrating a guidance system into the rocket's structure is a necessary development to enhance its operational effectiveness.

The conventional 2.75-inch rocket is designed without a control system and relies on high-speed spin stabilization to maintain flight stability. This characteristic makes the design of an in-flight trajectory control system particularly challenging and complex. The control system design must account for nonlinear dynamics, the rocket's unique aerodynamic properties, and external disturbances that may affect performance.

Previous studies have explored guidance system enhancements for the 2.75-inch rocket. For instance, the U.S. Army's Advanced Precision Kill Weapon System (APKWS) utilizes canard fin adjustments to modify the rocket's direction mid-flight [1]. The Skid-to-Turn autopilot system for APKWS has been designed and simulated to evaluate its performance [2]. Additionally, alternative guidance systems, such as the Hit-to-Kill Rocket Guidance Kit (Model HKGK), have been developed and analyzed, utilizing reaction thrusters for directional control [3]. These studies demonstrate the ongoing research and development of guidance systems for the 2.75-inch rocket.

While many existing approaches employ advanced control techniques such as model predictive control (MPC) or adaptive control, these methods often require high computational resources and complex implementation. In contrast, the method proposed in this study offers a practical trade-off between simplicity and performance robustness. This research focuses on designing a control system that prioritizes target-tracking accuracy while maintaining rocket stability under various flight conditions. A hybrid control approach is proposed, integrating Pole Placement and PI control. The Pole Placement technique is employed to modify the rocket's dynamic response by appropriately positioning the system's transfer function poles, ensuring both stability and desired performance. Meanwhile, PI control is incorporated to enhance system responsiveness and maintain accurate trajectory tracking. The guidance law follows a Proportional Navigation (PN) strategy to determine the required acceleration, followed by the designed control system, which determines the magnitude of the reaction thrust. Furthermore, the maximum angle of attack is constrained to preserve flight stability.

The proposed control system is evaluated through nonlinear simulations using a 6-degree-of-freedom (6-DOF) model implemented within the CADAC++ framework [4], a high-fidelity simulation tool for missile guidance and flight dynamics. This simulation provides a comprehensive assessment of the developed control system's performance and effectiveness.

2. Methods

This section presents the equations governing the rocket's motion dynamics and their transformation into a linearized form. The equations are then reformulated into the state-space representation. The next step involves designing the directional control system.

Due to the limitations of the Model HKGK guidance design, which prevents roll plane control, the control system is designed to regulate pitch and yaw motions using reaction thrust located within the guidance section. After presenting the relevant mathematical equations, the subsequent section will focus on simulation and performance analysis.

2.1 Nonlinear Equations of Motion

To accurately study the control of the rocket's motion and perform an in-depth analysis, the 6-DOF equations of motion are utilized (Fig. 1).

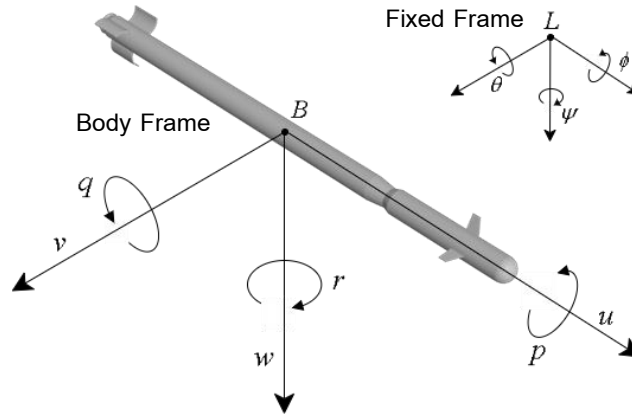


Fig 1 The 6-DOF equation of motion in the body frame

The translational equations of motion are derived based on Newton's second law.

$$\left[\frac{d(mV_B^E)}{dt} \right]^E = F + mG$$

And from the Transport Theorem.

$$\left[\frac{dV_B^E}{dt} \right]^E = \left[\frac{dV_B^E}{dt} \right]^B + [\Omega^{BE}]^B [V_B^E]^B$$

This leads to the translational equations of motion, which are presented in Equation (1).

$$m \left[\frac{dV_B^E}{dt} \right]^B + m [\Omega^{BE}]^B [V_B^E]^B = [F]^B + m [T]^{BL} [G]^L \quad (1)$$

The formulation of the rotational equations of motion begins with Euler's equations of rotational dynamics.

$$\left[\frac{d(I_B^B \omega^{BE})}{dt} \right]^E = M_B$$

By applying the Transport Theorem and assuming a constant moment of inertia for the rocket, the rotational equations of motion can be derived as shown in Equation (2).

$$[I_B^B]^B \left[\frac{d\omega^{BE}}{dt} \right]^B + [\Omega^{BE}]^B [I_B^B]^B [\omega^{BE}]^B = [M_B]^B \quad (2)$$

where:

$$[V_B^E]^B = [u \quad v \quad w]^T, \quad [\omega^{BE}]^B = [p \quad q \quad r]^T,$$

$$\left[\Omega^{BE}\right]^B = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix}, \quad \left[I_B^B\right]^B = \begin{bmatrix} I_{11} & 0 & 0 \\ 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & I_{22} \end{bmatrix}$$

The symbols used in Equations (1) and (2) are defined as follows: m is the mass of the rocket [kg]; V_B^E is the velocity vector of the rocket with respect to (wrt) the earth frame [m/s]; Ω^{BE} is the angular velocity vector of the rocket frame wrt the earth frame in the form of a skew-symmetric matrix [rad/s]; $[T]^{BL}$ is the transformation matrix to convert values from the flat Earth coordinate system to the rocket body coordinate system; G is the gravitational force vector [N]; I_B^B is the Moment of Inertia (MOI) tensor of the rocket referred to the rocket's center of gravity (c.g.) [kg·m²]; ω^{BE} is the angular velocity vector of the rocket frame wrt the earth frame [rad/s]; F is the force vector, consisting of the Thrust vector (F_t), Reaction Thrust vector (F_{rt}), and Aerodynamic Force vector (F_a) [N]; M_B is the moment vector, consisting of moments generated by the Reaction Thrust (M_{rt}) and Aerodynamic Moment (M_a) [N·m]; $[*]^B$ and $[*]^L$ are the vector or tensor * expressed in the body and the local-level coordinate system, respectively.

Equations (1) and (2) describe the motion of the rocket, including both translational motion and rotational motion along the Roll, Pitch, and Yaw axes. These equations are nonlinear differential equations, where the nonlinearities arise from terms such as the product of velocity and angular velocity in Equation (1), and the cross product of angular velocity and angular momentum in Equation (2).

The terms of Aerodynamic Force and Moment can be expressed in terms of Aerodynamic Coefficients, as shown in Fig. 2.

$$\begin{aligned} [F_a]^B &= \bar{q}S \begin{bmatrix} -C_A & C_Y & -C_N \end{bmatrix}^T \\ [M_a]^B &= \bar{q}Sd \begin{bmatrix} C_l & C_m & C_n \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

where $\bar{q}$ is the dynamic pressure [N/m²]; S is the reference area [m²]; d is the rocket diameter [m]; C_A , C_Y , C_N , C_l , C_m and C_n are the axial force coefficient, side force coefficient, normal force coefficient, rolling moment coefficient, pitching moment coefficient, and yawing moment coefficient, respectively.

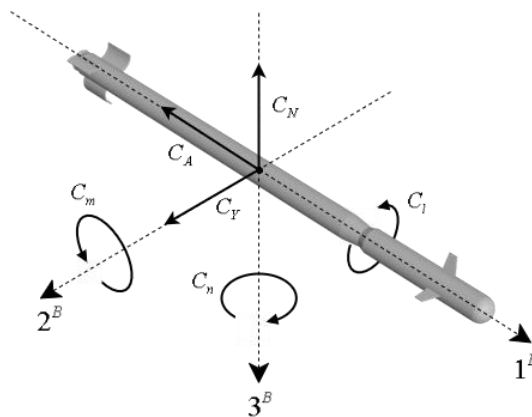


Fig 2 Force and moment aerodynamics coefficient

2.2 Linearization and State Space Equation

The control system used for the direction control of the rocket in this research utilizes a PI controller combined with pole placement techniques, which is a classical control method. This approach is suitable for linear systems. However, since the motion equations (1) and (2) describe a nonlinear system, a direct design of the control system is not possible. Therefore, linearization must be performed prior to design. It is assumed that changes in the rocket's direction are considered a small perturbation to the system. Under this assumption, the state of the system can be expressed as the sum of a reference component and a perturbation component. That is,

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{R}^{BpBr} \mathbf{x}_r + \varepsilon \mathbf{x}$$

where $\mathbf{x}_p$ and $\mathbf{x}_r$ are the state vectors at the perturbed and reference flights, respectively; $\varepsilon \mathbf{x}$ is the perturbation; $\mathbf{R}^{BpBr}$ is the rotation tensor of the perturbed frame wrt the reference frame.

By substituting each variable in Equation (1) with the summation of its reference and perturbation components, the following expression is obtained:

$$\begin{aligned} & m \left[\frac{d \left(\mathbf{R}^{BpBr} \mathbf{V}_{Br}^E + \varepsilon \mathbf{V}_B^E \right)}{dt} \right]^{Bp} + m \left[\left(\mathbf{R}^{BpBr} \boldsymbol{\Omega}^{BrE} \overline{\mathbf{R}^{BpBr}} + \varepsilon \boldsymbol{\Omega}^{BE} \right) \right]^{Bp} \left[\left(\mathbf{R}^{BpBr} \mathbf{V}_{Br}^E + \varepsilon \mathbf{V}_B^E \right) \right]^{Bp} \\ & = \left[\left(\mathbf{R}^{BpBr} \mathbf{F}_r + \varepsilon \mathbf{F} \right) \right]^{Bp} + m \left[\left(\mathbf{R}^{BpBr} \mathbf{G}_r + \varepsilon \mathbf{G} \right) \right]^{Bp} \end{aligned}$$

where $\boldsymbol{\omega}^{BpBr}$ is the angular velocity vector of the perturbed rocket frame wrt the reference rocket frame [rad/s]; $[*]^{Bp}$ and $[*]^{Br}$ are the vector or tensor * expressed in the perturbed and the reference coordinate system, respectively.

In the present analysis, a steady reference flight condition is assumed, in which the reference flight is considered non-accelerated and non-rotating.

$$\begin{aligned} & m \left[\frac{d \left(\mathbf{R}^{BpBr} \right)}{dt} \right]^{Bp} \left[\mathbf{V}_{Br}^E \right]^{Bp} + m \left[\mathbf{R}^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\frac{d \left(\mathbf{V}_{Br}^E \right)}{dt} \right]^{Bp} + m \left[\frac{d \left(\varepsilon \mathbf{V}_B^E \right)}{dt} \right]^{Bp} \\ & + m \left[\varepsilon \boldsymbol{\Omega}^{BE} \right]^{Bp} \left[\mathbf{R}^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\mathbf{V}_{Br}^E \right]^{Bp} + m \left[\varepsilon \boldsymbol{\Omega}^{BE} \right]^{Bp} \left[\varepsilon \mathbf{V}_B^E \right]^{Bp} \\ & = \left[\mathbf{R}^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\mathbf{F}_r \right]^{Bp} + \left[\varepsilon \mathbf{F} \right]^{Bp} + m \left[\mathbf{R}^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\mathbf{G}_r \right]^{Bp} + m \left[\varepsilon \mathbf{G} \right]^{Bp} \end{aligned}$$

The underlined term corresponds to the translational motion of the reference flight, rotated by a rotation tensor. Since the rotation tensor appears identically on both sides of the equation, the term cancels out. Together with the relations defined as:

$$\begin{aligned} \varepsilon \boldsymbol{\Omega}^{BE} &= \boldsymbol{\Omega}^{BpE} - \mathbf{R}^{BpBr} \boldsymbol{\Omega}^{BrE} \overline{\mathbf{R}^{BpBr}} \\ \boldsymbol{\omega}^{BpE} &= \boldsymbol{\omega}^{BpBr} + \boldsymbol{\omega}^{BrE} \end{aligned}$$

Based on the above assumptions, the equation can be reformulated as:

$$m \left[\frac{d \left(\mathbf{R}^{BpBr} \right)}{dt} \right]^{Bp} \left[\mathbf{V}_{Br}^E \right]^{Bp} + m \left[\frac{d \left(\varepsilon \mathbf{V}_B^E \right)}{dt} \right]^{Bp} + m \left[\boldsymbol{\Omega}^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\varepsilon \mathbf{V}_B^E \right]^{Bp} = \left[\varepsilon \mathbf{F} \right]^{Bp} + m \left[\varepsilon \mathbf{G} \right]^{Bp}$$

Under the assumption of small perturbation, the relation can be approximated as:

$$\frac{d(R^{BpBr})}{dt} \approx \Omega^{BpBr} R^{BpBr}$$

Together with the relation $\left[R^{BpBr} \right]^{Bp} = [T]^{BpBr}$, it follows that

$$m \left[\Omega^{BpBr} \right]^{Bp} \left[V_{Br}^E \right]^{Br} + m \left[\frac{d(\varepsilon V_B^E)}{dt} \right]^{Bp} + m \left[\Omega^{BpBr} \right]^{Bp} \left[\varepsilon V_B^E \right]^{Bp} = [\varepsilon F]^{Bp} + m [\varepsilon G]^{Bp}$$

The underlined term remains nonlinear of second order. In the context of small perturbation analysis, this term becomes negligibly small and can therefore be omitted. Furthermore, to simplify the control system design, the term $m \left[\Omega^{BpBr} \right]^{Bp} \left[V_{Br}^E \right]^{Br}$, as well as the gravity force and thrust force terms, are also excluded from consideration.

The forces and moments generated by aerodynamics typically depend on multiple variables, which are nonlinear functions.

$$\begin{aligned} \varepsilon F_a = F_{ap} - F_{ar} &= \frac{\partial F_a}{\partial V_B^E} (\varepsilon V_B^E) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_a}{\partial V_B^{E2}} (\varepsilon V_B^E)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 F_a}{\partial V_B^{E3}} (\varepsilon V_B^E)^3 + \dots \\ &+ \frac{\partial F_a}{\partial \omega^{BpBr}} (\omega^{BpBr}) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_a}{\partial \omega^{BpBr2}} (\omega^{BpBr})^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 F_a}{\partial \omega^{BpBr3}} (\omega^{BpBr})^3 + \dots \\ &+ \frac{\partial F_a}{\partial \dot{V}_B^E} (\varepsilon \dot{V}_B^E) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F_a}{\partial \dot{V}_B^{E2}} (\varepsilon \dot{V}_B^E)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 F_a}{\partial \dot{V}_B^{E3}} (\varepsilon \dot{V}_B^E)^3 + \dots \end{aligned}$$

By considering small variations and using a Taylor series expansion, the nonlinear functions can be approximated to linear forms by discarding the higher-order terms. The linearized equation of motion can then be written as follows.

$$m \left[\frac{d\varepsilon V_B^E}{dt} \right]^{Bp} = \left[\frac{\partial F_a}{\partial V_B^E} \right]^{Bp} [\varepsilon V_B^E]^{Bp} + \left[\frac{\partial F_a}{\partial \omega^{BpBr}} \right]^{Bp} [\omega^{BpBr}]^{Bp} + \left[\frac{\partial F_a}{\partial \dot{V}_B^E} \right]^{Bp} [\varepsilon \dot{V}_B^E]^{Bp} + [\varepsilon F_{rt}]^{Bp} \quad (3)$$

Given the definitions $[F_a]^{Bp} = [X \ Y \ Z]^T$ and $[F_{rt}]^{Bp} = [0 \ T_y \ -T_z]^T$, the decomposition of the matrix components can be expressed as:

$$m \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial u} & \frac{\partial X}{\partial v} & \frac{\partial X}{\partial w} \\ \frac{\partial Y}{\partial u} & \frac{\partial Y}{\partial v} & \frac{\partial Y}{\partial w} \\ \frac{\partial Z}{\partial u} & \frac{\partial Z}{\partial v} & \frac{\partial Z}{\partial w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial p} & \frac{\partial X}{\partial q} & \frac{\partial X}{\partial r} \\ \frac{\partial Y}{\partial p} & \frac{\partial Y}{\partial q} & \frac{\partial Y}{\partial r} \\ \frac{\partial Z}{\partial p} & \frac{\partial Z}{\partial q} & \frac{\partial Z}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial X}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial X}{\partial \dot{w}} \\ \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial Y}{\partial \dot{w}} \\ \frac{\partial Z}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial Z}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial Z}{\partial \dot{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_y \\ -T_z \end{bmatrix}$$

In this context, X , Y and Z represent the first, second, and third components of the aerodynamic force vector, respectively. These components can be expressed as $X = -A$, where A is the axial force, Y is the side force, and $Z = -N$, where N is the normal force. T_y and T_z are the side force and normal force from the reaction thrust, respectively [N].

For the rotational equations of motion, a similar linearization approach can be applied under the small perturbation assumption, as was done for the translational case.

By defining $[M_a]^{Bp} = [LL \ M \ LN]^T$ and $[M_{rt}]^{Bp} = [0 \ T_z(x_{cg} - x_t) \ T_y(x_{cg} - x_t)]^T$, the linearized rotational equations of motion can be written as:

$$\begin{aligned}
\left[I_{Bp}^{Bp} \right]^{Bp} \left[\frac{d\omega^{BpBr}}{dt} \right]^{Bp} &= \left[\frac{\partial M_a}{\partial V_B^E} \right]^{Bp} \left[\varepsilon V_B^E \right]^{Bp} + \left[\frac{\partial M_a}{\partial \omega^{BpBr}} \right]^{Bp} \left[\omega^{BpBr} \right]^{Bp} + \left[\frac{\partial M_a}{\partial V_B^E} \right]^{Bp} \left[\varepsilon \dot{V}_B^E \right]^{Bp} + \left[\varepsilon M_{rt} \right]^{Bp} \\
\begin{bmatrix} I_{11} & 0 & 0 \\ 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & I_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial LL}{\partial u} & \frac{\partial LL}{\partial v} & \frac{\partial LL}{\partial w} \\ \frac{\partial M}{\partial u} & \frac{\partial M}{\partial v} & \frac{\partial M}{\partial w} \\ \frac{\partial LN}{\partial u} & \frac{\partial LN}{\partial v} & \frac{\partial LN}{\partial w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial LL}{\partial p} & \frac{\partial LL}{\partial q} & \frac{\partial LL}{\partial r} \\ \frac{\partial M}{\partial p} & \frac{\partial M}{\partial q} & \frac{\partial M}{\partial r} \\ \frac{\partial LN}{\partial p} & \frac{\partial LN}{\partial q} & \frac{\partial LN}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} \frac{\partial LL}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial LL}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial LL}{\partial \dot{w}} \\ \frac{\partial M}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial M}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial M}{\partial \dot{w}} \\ \frac{\partial LN}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial LN}{\partial \dot{v}} & \frac{\partial LN}{\partial \dot{w}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_z(x_{cg} - x_t) \\ T_y(x_{cg} - x_t) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4}$$

where LL , M and LN are the rolling moment, pitching moment, and yawing moment, respectively [N·m]; x_{cg} and x_t are the distances between the c.g. and the position of the reaction thrust from the rocket's nose, respectively [m].

From Equations (3) and (4), the complexity of the calculations can be reduced by minimizing the number of aerodynamic force and moment terms. This can be achieved by applying the derivative map [5], which selectively includes only the derivative terms that have a significant influence on the forces and the moments acting on the rocket. As a result, the equations can be reformulated in scalar form as follows:

$$\begin{aligned}
m\dot{u} &= X_u u + X_{\dot{u}} \dot{u} \\
m\dot{v} &= Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + T_y \tag{5}
\end{aligned}$$

$$m\dot{w} = Z_w w + Z_q q + Z_{\dot{w}} \dot{w} - T_z$$

$$I_{11}\dot{p} = LL_p p$$

$$I_{22}\dot{q} = M_w w + M_q q + M_{\dot{w}} \dot{w} + T_z(x_{cg} - x_t) \tag{6}$$

$$I_{22}\dot{r} = LN_v v + LN_r r + LN_{\dot{v}} \dot{v} + T_y(x_{cg} - x_t)$$

Since there is no control over the rotational motion in the roll plane, the equations related to the motion in the roll plane can be discarded. In terms of aerodynamic force and moment, the variables v , w , $\dot{v}$ and $\dot{w}$ can be replaced with the sideslip angle (β), angle of attack (α), side acceleration (a_l), and normal acceleration (a_n), respectively. By neglecting the less significant terms, Equations (5) and (6) can be rewritten as Equations (7) and (8), respectively.

$$ma_l = Y_{\beta} \beta + T_y \tag{7}$$

$$ma_n = -Z_{\alpha} \alpha + T_z$$

$$I_{22}\dot{q} = M_{\alpha} \alpha + M_q q + T_z(x_{cg} - x_t) \tag{8}$$

$$I_{22}\dot{r} = LN_{\beta} \beta + LN_r r + T_y(x_{cg} - x_t)$$

When considering small perturbation in the angle of attack, the relationship between normal acceleration and the flight path angle (γ) can be expressed by Equation (9).

$$a_n = V\dot{\gamma} \quad (9)$$

Similarly, the relationship between side acceleration and the heading angle (χ) is given by Equation (10).

$$a_l = V\dot{\chi} \quad (10)$$

$$\dot{\gamma} = q - \dot{\alpha} \text{ and } \dot{\chi} = r + \dot{\beta}$$

where V is the relative speed [m/s].

By taking the derivative of Equation (7) and substituting the values from Equations (9) and (10), and neglecting the dynamics of the reaction thrusters, the equations can be rewritten as Equations (11) and (12).

$$m\dot{a}_l = \frac{Y_\beta}{V} a_l - Y_\beta r \quad (11)$$

$$m\dot{a}_n = \frac{Z_\alpha}{V} a_n - Z_\alpha q$$

$$I_{22}\dot{q} = -\frac{mM_\alpha}{Z_\alpha} a_n + M_q q + T_z (x_{cg} - x_t) \quad (12)$$

$$I_{22}\dot{r} = \frac{mLN_\beta}{Y_\beta} a_l + LN_r r + T_y (x_{cg} - x_t)$$

where $Y_\beta = \bar{q}SC_{Y_\beta}$; $Z_\alpha = -\bar{q}SC_{N_\alpha}$; $M_\alpha = \bar{q}SdC_{m_\alpha}$;

$$M_q = \frac{\bar{q}Sd^2}{2V} C_{m_q}$$
; $LN_\beta = \bar{q}SdC_{n_\beta}$ and $LN_r = \frac{\bar{q}Sd^2}{2V} C_{n_r}$

From Equations (11) and (12), a state-space equation for a linear system can be formulated in the following form.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx}$$

This can be divided into two motion directions: the longitudinal equation and the lateral equation.

$$\mathbf{x}_{long} = [q \ a_n]^T$$

$$\mathbf{x}_{lat} = [r \ a_l]^T$$

$$\mathbf{u}_{long} = T_z$$

$$\mathbf{u}_{lat} = T_y$$

$$\mathbf{A}_{long} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{22}} & 0 \\ -\frac{Z_\alpha}{m} & \frac{Z_\alpha}{mV} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{lat} = \begin{bmatrix} \frac{LN_r}{I_{22}} & 0 \\ -\frac{Y_\beta}{m} & \frac{Y_\beta}{mV} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{(x_{cg} - x_t)}{I_{22}} \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Variables followed by the subscript "*long*" refer to the variables associated with the longitudinal direction, while "*lat*" refers to variables related to the lateral direction. Variables without a subscript are used for both longitudinal and lateral directions.

2.3 Autopilot Design for HKGK Model

A widely used method for controlling the direction of a missile to track a target is acceleration control, chosen due to its high accuracy. In this study, this method was chosen, and a hybrid control technique combining pole placement and a PI controller was employed. The control system can be represented by the block diagram shown in Fig. 3.

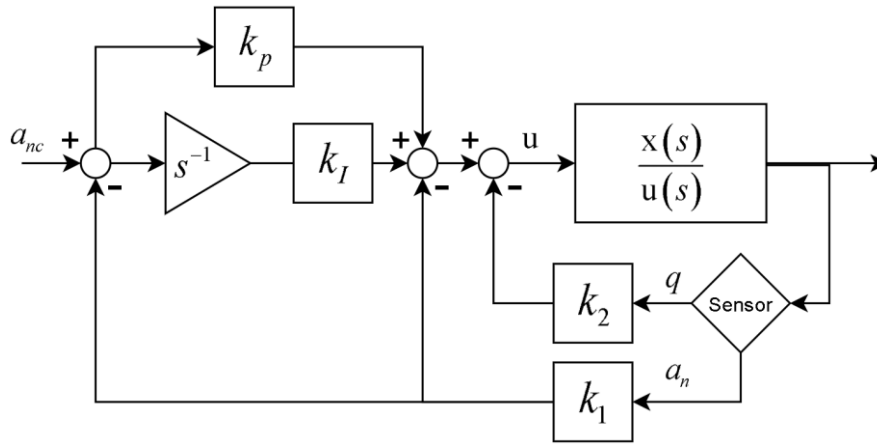


Fig 3 Normal acceleration control by pole placement technique and PI controller

From Fig. 3, the system can be separated into two feedback loops: The inner loop consists of the pole placement technique, which includes the acceleration loop and the rate loop. The rate loop is added to enhance the stability of the system. The outer loop consists of the PI controller, which is used to control the response speed and reduce steady-state errors in acceleration.

The transfer function of the system can be obtained by taking the Laplace transformation of the state space equation. The result will be.

$$\begin{aligned} s\mathbf{x}(s) &= A\mathbf{x}(s) + B\mathbf{u}(s) \\ \mathbf{y}(s) &= C\mathbf{x}(s) \end{aligned}$$

$$\text{where } \mathbf{u}(s) = \begin{bmatrix} -k_2 & -k_p - \frac{k_I}{s} - k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(s) \\ a_n(s) \end{bmatrix} + \left(k_p + \frac{k_I}{s} \right) a_{nc}(s), \text{ which can be written as } \mathbf{u}(s) = \mathbf{a}_1 \mathbf{x}(s) + \mathbf{a}_2 \mathbf{u}'(s)$$

By substituting the value of $u(s)$ into the state space equation and rearranging, the new equation will be.

$$\begin{aligned} sx(s) &= Ax(s) + B[a_1x(s) + a_2u'(s)] \\ [sI - (A + Ba_1)]x(s) &= Ba_2u'(s) \\ [sI - A']x(s) &= B'u'(s) \end{aligned}$$

The poles of the system can be obtained from the eigenvalues of the matrix A' by considering the characteristic equation of the system.

$$\text{Det}(sI - A') = 0$$

When substituted with the matrix, the result will be.

$$\text{Det} \left[\begin{array}{cc} s - \frac{M_q}{I_{22}} + \frac{(x_{cg} - x_t)k_2}{I_{22}} & \frac{(x_{cg} - x_t) \left(k_p + \frac{k_I}{s} + k_1 \right)}{I_{22}} \\ \frac{Z_\alpha}{m} & s - \frac{Z_\alpha}{mV} \end{array} \right] = 0$$

This can then be written as the equation.

$$s^3 + a_ms^2 + b_ms + c_m = 0 \quad (13)$$

where

$$\begin{aligned} a_m &= - \left(\frac{M_q}{I_{22}} + \frac{Z_\alpha}{mV} - \frac{(x_{cg} - x_t)k_2}{I_{22}} \right) \\ b_m &= - \left(\frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_1}{mI_{22}} - \frac{M_q Z_\alpha}{mVI_{22}} + \frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_p}{mI_{22}} + \frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_2}{mVI_{22}} \right) \\ c_m &= - \frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_I}{mI_{22}} \end{aligned}$$

From the cubic polynomial equation, it can be rewritten in terms of the damping ratio (ζ) and natural frequency (ω_n) as shown in equation (14).

$$\begin{aligned} (s + p)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) &= 0 \\ s^3 + (2\zeta\omega_n + p)s^2 + (\omega_n^2 + 2p\zeta\omega_n)s + p\omega_n^2 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

where $(s + p)$ is the factor of the polynomial that gives a real pole, with the pole positioned at $-p$ on the s-plane.

By comparing equations (13) and (14), the following is obtained.

$$\begin{aligned}
(2\zeta\omega_n + p) &= -\left(\frac{M_q}{I_{22}} + \frac{Z_\alpha}{mV} - \frac{(x_{cg} - x_t)k_2}{I_{22}}\right) \\
(\omega_n^2 + 2p\zeta\omega_n) &= -\left(\frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_1}{mI_{22}} - \frac{M_q Z_\alpha}{mVI_{22}} + \frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_p}{mI_{22}} + \frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_2}{mVI_{22}}\right) \\
p\omega_n^2 &= -\frac{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha k_I}{mI_{22}}
\end{aligned}$$

And the gain value can be calculated as shown in Equation (15).

$$\begin{aligned}
k_I &= -\frac{mpI_{22}\omega_n^2}{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha} \\
k_2 &= \frac{I_{22}}{(x_{cg} - x_t)}\left(p + 2\omega_n\zeta + \frac{M_q}{I_{22}} + \frac{Z_\alpha}{mV}\right) \\
k_1 &= -\frac{mI_{22}}{(x_{cg} - x_t)Z_\alpha}\left(\omega_n^2 + 2p\omega_n\zeta + \frac{2\omega_n\zeta Z_\alpha}{mV} + \frac{pZ_\alpha}{mV} + \frac{Z_\alpha^2}{m^2V^2}\right) - k_p
\end{aligned} \tag{15}$$

For lateral acceleration control, it can be done in the same way as for normal acceleration. Finally, the gain equation for lateral control is given in (16).

$$\begin{aligned}
k_I &= -\frac{mpI_{22}\omega_n^2}{(x_{cg} - x_t)Y_\beta} \\
k_2 &= \frac{I_{22}}{(x_{cg} - x_t)}\left(p + 2\omega_n\zeta + \frac{LN_r}{I_{22}} + \frac{Y_\beta}{mV}\right) \\
k_1 &= -\frac{mI_{22}}{(x_{cg} - x_t)Y_\beta}\left(\omega_n^2 + 2p\omega_n\zeta + \frac{2\omega_n\zeta Y_\beta}{mV} + \frac{pY_\beta}{mV} + \frac{Y_\beta^2}{m^2V^2}\right) - k_p
\end{aligned} \tag{16}$$

The gain k_1 , k_2 and k_I will be recalculated continuously to keep the pole positions of the system at their appropriate locations as defined.

The design of the HKGK model's attitude control will be adjusted using the thrust forces from three reaction thrusters in the guidance system, with their positions arranged as shown in Fig. 4.

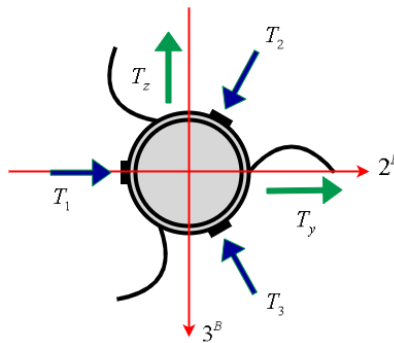


Fig 4 The positions and directions of the reaction thrust vectors

The thrust force generated by each reaction thruster is related to the resultant side force (T_y) and normal force (T_z) according to Equation (17).

$$\begin{aligned}
 T_y &= T_1 - (T_2 + T_3) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \\
 T_z &= (T_3 - T_2) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

where T_1 , T_2 and T_3 are the thrust forces from reaction thrusters at positions 1, 2, and 3, respectively [N].

3. Simulation and Evaluation

3.1 Simulation Using the CADAC++ Framework

The simulation framework Computer Aided Design of Aerospace Concepts (CADAC) was originally developed using FORTRAN and later upgraded to C++ for its advantages in object-oriented programming. This updated version is referred to as CADAC++ [4]. CADAC++ is a framework designed to assist in the development and simulation of complex dynamic systems, particularly in the context of aerospace, aviation, and autonomous control systems. It allows for accurate simulation of the motion and control of these systems. In addition, CADAC++ can simulate noise or disturbances from both sensors and environmental conditions, which further enhances the reliability of the simulations.

In this study, the direction control of a 2.75-inch aerial rocket is simulated using the CADAC++ framework. A 6-DOF model is used to provide the most realistic analysis possible. The rocket follows a semi-active guidance system, where it receives target position signals from a laser designated by ground forces. For the simulation, it is assumed that the rocket can detect the target's position via the laser sensor even before launch. Upon launch, after approximately 1.3 seconds, which is the time when thrust from the rocket's engine runs out, the rocket enters the terminal phase and starts using the designed control system for direction control. This simulation assumes that throughout the entire flight, the rocket can always detect the target's position.

From the 1.3-second mark onward, the rocket enters the terminal phase, accurately guiding toward the target. The control system begins calculating acceleration commands using the PN guidance law. The acceleration command is then sent to the control system to be converted into the required thrust values to adjust the rocket's direction using reaction thrust. The control system continuously receives the rocket's status after each reaction thrust operation and makes adjustments accordingly, until the rocket either hits the target or impacts the ground. The overall working diagram is shown in Fig. 5.

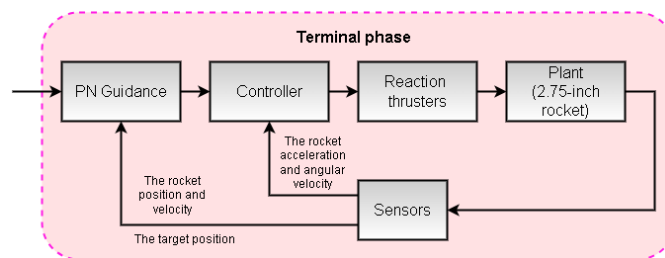


Fig 5 Overview of the rocket simulation operation

For the conditions of the simulation, it is assumed that the M151 warhead is used, which affects the various physical properties of the rocket. The distance between the rocket and the target is set from 4 to 9 km along the ground, with the target remaining stationary. The rocket's altitude at launch is 1 km above the ground level. The aircraft is assumed to fly at a speed of 185 m/s while launching the rocket. The LOS error, which includes Azimuth error ($\Delta\psi$) and Elevation error ($\Delta\theta$) at the moment of launch, is set between -30 to 30 degrees. These errors are related to the rocket's pitch and yaw angles as shown in equation (18).

$$\begin{aligned}\psi_0 &= \psi_{LOS} + \Delta\psi \\ \theta_0 &= \theta_{LOS} + \Delta\theta\end{aligned}\tag{18}$$

where ψ_0 and θ_0 are the Yaw and Pitch angles of the rocket at the moment of launch, respectively; ψ_{LOS} and θ_{LOS} are the Azimuth and Elevation angles of the LOS, respectively.

In the simulation, the effects of the changing mass and Moment of Inertia (MOI) of the rocket while flying are taken into account. Furthermore, limits are set for the acceleration command signals to ensure that the angle of attack and side slip do not exceed 20 degrees, which helps maintain the stability of the rocket during flight control.

3.2 Simulation Performance Evaluation

The performance analysis is divided into two main aspects: the response of the rocket's acceleration control system and the accuracy of the rocket. These analyses provide insights into the overall effectiveness of the rocket with an integrated guidance system. The details of each aspect are as follows:

3.2.1 Control System Response Analysis

The acceleration control system was designed using a hybrid approach combining pole placement and a PI controller, as described in Section 2.3. This design requires specifying the system's pole locations by defining the constants ζ , ω_n , and p , which influence both the system's stability and response characteristics. Additionally, the gain k_p can be adjusted to fine-tune the system's response sensitivity.

For a 2.75-inch rocket, a rapid response is essential because the rocket has a very short time to reach the target. Since directional control begins approximately 1.3 seconds after launch, a slow response could significantly reduce targeting accuracy. At the same time, maintaining stability during flight is crucial to ensure the reliability of the control system.

From the simulation, the constants were set to $\zeta = 0.7$, $\omega_n = 9.8$ rad/s, $p = 40$ rad/s and $k_p = 1$. The resulting normal acceleration response of the control system is shown in Fig. 6.

From the response shown in Fig. 6, the rocket's normal acceleration effectively follows the control system's command and reaches a steady-state value relatively quickly. This is because the natural frequency was set to a relatively high value. However, a slight overshoot occurs during the initial response to control signal changes due to the use of a damping ratio less than 1, which results in an underdamped system behavior.

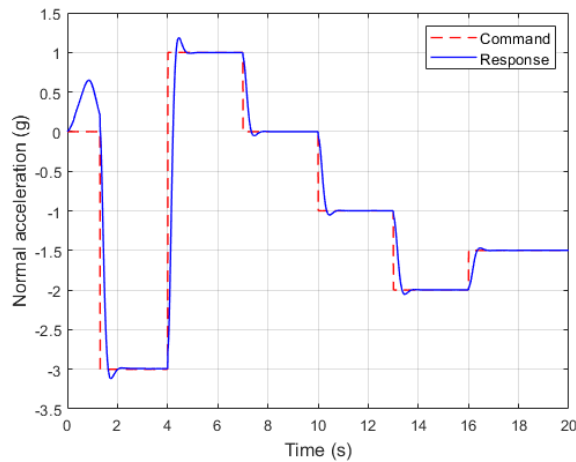


Fig 6 Normal acceleration response of the control system

When examining the steady-state normal acceleration, there is only minor oscillation in the signal. This oscillation is negligible and does not exhibit any tendency to grow over time, ensuring that the system remains stable. Therefore, the control system successfully provides a rapid response while maintaining stability throughout the flight.

To confirm that the rocket maintains stability while undergoing acceleration control, the angle of attack (AOA) during flight can be analyzed, as shown in Fig. 7. The angle varies in response to the acceleration command, exhibiting minor oscillations only during the initial phase of signal changes. These transient oscillations do not significantly affect the overall stability of the rocket.

Additionally, during the steady-state phase, where acceleration signals fluctuate slightly, these variations do not impact the stability of the angle of attack at that moment. This indicates that the control system effectively maintains stable flight characteristics throughout the maneuver.

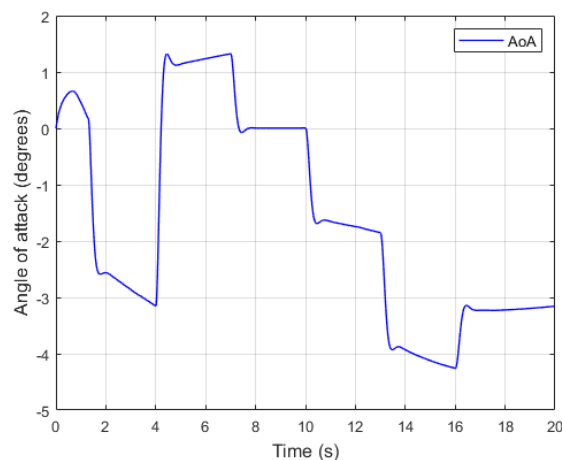


Fig 7 Angle of attack during normal acceleration control

The response of the lateral acceleration control signal exhibits a similar behavior to that of the normal acceleration when the same constant values are applied. The system maintains stability while effectively responding to control commands, ensuring precise maneuverability of the rocket.

3.2.2 Accuracy Analysis

The accuracy assessment is conducted through a simulated rocket launch under the conditions described in Section 3.1, assuming that each reaction thruster produces a maximum thrust of 4.9 N. Accuracy is evaluated based on the miss distance between the rocket and the target, using the c.g. as a reference point for both objects. The miss distance is measured when the rocket reaches the ground, ensuring that the c.g. positions of the rocket and the target are at the same altitude. The results of the simulated launches are presented in Tables 1–6.

Table 1: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 4000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-15	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-10	>50	>50	>50	26.7041	>50	>50	>50	>50	>50
-5	>50	>50	0.0902	0.0676	>50	>50	>50	>50	>50
0	>50	43.3668	0.0921	0.0696	23.2308	>50	>50	>50	>50
5	>50	>50	2.8069	18.6418	32.7264	>50	>50	>50	>50
10	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
15	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Table 2: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 5000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-15	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-10	>50	>50	0.0710	0.0495	>50	>50	>50	>50	>50
-5	>50	0.0819	0.0693	0.0525	0.0405	>50	>50	>50	>50
0	>50	0.0984	0.0697	0.0530	0.0401	0.0314	>50	>50	>50
5	>50	0.0995	0.0702	0.0524	0.0393	0.0292	>50	>50	>50
10	>50	>50	38.9640	11.4701	26.6625	7.6116	>50	>50	>50
15	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Table 3: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 6000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-15	>50	31.3999	0.0586	0.0536	0.0268	>50	>50	>50	>50
-10	>50	0.0676	0.0630	0.0442	0.0328	0.0268	>50	>50	>50
-5	0.0892	0.0894	0.0641	0.0453	0.0321	0.0240	0.0189	>50	>50
0	0.1014	0.0920	0.0639	0.0451	0.0320	0.0234	0.0181	23.2397	>50
5	0.0953	0.1176	0.0693	0.0440	0.0320	0.0231	0.0175	39.1378	>50
10	0.1203	0.0978	0.0629	0.0480	0.0356	0.0251	0.0197	>50	>50
15	>50	>50	47.2664	10.6291	22.3619	>50	12.6340	>50	>50
20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Table 4: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 7000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
-25	>50	>50	11.8709	0.0995	6.1333	>50	30.9069	>50	>50
-20	>50	0.2374	0.0447	0.0024	0.0369	0.0136	0.0647	>50	>50
-15	>50	0.1389	0.1123	0.0208	0.0269	0.0154	0.0604	0.4769	>50

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-10	12.5639	0.0237	0.0147	0.0351	0.0221	0.0073	0.0011	0.0004	0.0326
-5	0.3295	0.1313	0.0510	0.0273	0.0201	0.0138	0.0064	0.0103	0.0139
0	0.0533	0.1190	0.0403	0.0434	0.0255	0.0189	0.0100	0.0034	0.0305
5	0.0503	0.0510	0.0934	0.0474	0.0127	0.0172	0.0075	0.0019	0.0030
10	0.1125	0.0984	0.1159	0.0398	0.0508	0.0182	0.0100	0.0031	0.0028
15	8.0260	0.0964	0.0295	0.0465	0.0484	0.9998	2.8431	0.0300	0.0075
20	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
25	19.8699	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Table 5: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 8000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	1.4519	1.1580	0.1321	0.1135	0.0362	0.0153	0.0145	>50	9.4038
-25	37.6822	0.1057	0.1329	0.0911	0.0144	0.0185	0.0406	>50	0.0597
-20	4.5836	0.0420	0.1835	0.1066	0.0235	0.0248	0.0141	3.8366	0.0129
-15	38.9477	0.2017	0.0474	0.0216	0.0229	0.0089	0.0006	0.0097	0.0089
-10	0.2347	0.1971	0.0819	0.0573	0.0998	0.0219	0.0343	0.0365	0.0054
-5	0.2138	0.0338	0.1435	0.0055	0.0265	0.0167	0.0177	0.0097	0.0008
0	0.1945	0.1513	0.1470	0.0149	0.0480	0.0116	0.0306	0.0081	0.0077
5	0.1719	0.2593	0.0226	0.0441	0.0468	0.0529	0.0312	0.0023	0.0078
10	0.1601	0.1946	0.1457	0.0987	0.0161	0.0074	0.0043	0.0091	0.0088
15	0.0651	0.1653	0.1731	0.0299	0.0485	0.0295	0.0303	0.0458	0.0125
20	11.6123	6.2178	7.1200	2.8860	0.1120	0.0197	4.3812	3.8366	4.8891
25	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
30	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Table 6: Miss Distance at a Rocket-to-Target Displacement of 9000 m

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-30	25.4865	16.9399	0.2060	0.0602	0.0792	0.0666	0.0149	0.0218	0.2532
-25	0.2300	0.2121	0.1338	0.0941	0.1282	0.0315	0.0016	0.0443	0.0071
-20	0.1945	0.2274	0.1301	0.0227	0.0779	0.0503	0.0256	0.0377	0.0242
-15	0.2120	0.2196	0.0968	0.1201	0.1022	0.0072	0.0050	0.0123	0.0191

$\Delta\psi \setminus \Delta\theta$ (degrees)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
-10	0.2473	0.1507	0.2034	0.1057	0.0914	0.1009	0.0125	0.0093	0.0146
-5	0.1184	0.2251	0.0870	0.1518	0.0495	0.0816	0.0151	0.0093	0.0133
0	0.2767	0.2540	0.1484	0.1271	0.0444	0.0505	0.0259	0.0118	0.0111
5	0.2846	0.0737	0.1454	0.1086	0.1338	0.0521	0.0240	0.0085	0.0150
10	0.2477	0.1067	0.0029	0.1792	0.0258	0.0546	0.0504	0.0134	0.0165
15	0.2985	0.0380	0.1577	0.0281	0.1266	0.0223	0.0304	0.0059	0.0139
20	0.3003	0.0609	4.1036	0.1523	0.0911	0.1378	0.0373	0.0024	0.0130
25	7.2814	8.0398	4.6013	11.0329	9.7683	7.5389	1.4498	6.6340	7.8275
30	>50	47.2622	4.1810	0.8245	>50	45.1004	41.6817	9.1338	10.2938

From the simulation results presented in Tables 1-6, the rocket demonstrates high accuracy, with the minimum miss distances recorded as 0.0676, 0.0292, 0.0175, 0.0004, 0.0006, and 0.0016 meters for target displacements of 4, 5, 6, 7, 8, and 9 km, respectively. Furthermore, as the displacement increases from 4 to 9 km, the rocket maintains good accuracy even when launched with a larger LOS error. This is because the reaction thruster's thrust is structurally limited, restricting the rocket's ability to change direction rapidly over time. As a result, at shorter displacement distances, the rocket has a limited turning capability. However, the results in Tables 1-6 only consider a maximum displacement of 9 km. If the displacement increases beyond this range, accuracy may degrade due to the thrust limitations of the rocket.

In this study, a Monte Carlo simulation was conducted, incorporating disturbances from atmospheric conditions and signals from the Inertial Navigation System (INS). A total of 100 simulations were performed to determine the 50% Circular Error Probable (CEP) of the rocket. The 50% CEP is defined as the radius of a circle, centered at the c.g. of target point, within which 50% of the simulated impacts are contained. The use of Monte Carlo simulations with the 50% CEP method is widely adopted and effective for evaluating the accuracy of guidance systems, particularly when assessing the uncertainties that influence the outcome of a launch.

The launch conditions followed the specifications described in Section 3.1, assuming a displacement of 6 km between the rocket and the target. The launch angles were set with $\Delta\psi = 0^\circ$ and $\Delta\theta = 5^\circ$. From the simulation results, the 50% CEP was found to be 0.0448 m, demonstrating the accuracy and reliability of the rocket's trajectory control. The analysis of the 50% CEP is illustrated in Fig. 8.

However, the analysis of the 50% CEP in this case is based on a single launch condition to demonstrate that even when the system is subjected to disturbances, the rocket can still be controlled to accurately impact the target. For other launch conditions, the 50% CEP values will vary, but the miss distances will show a similar clustering pattern as in the example case.

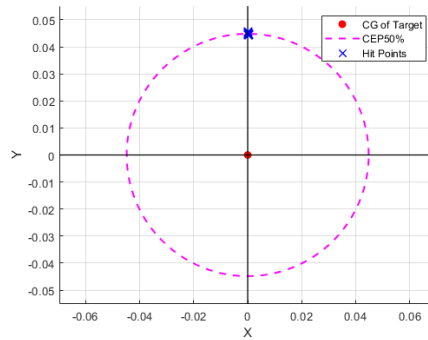
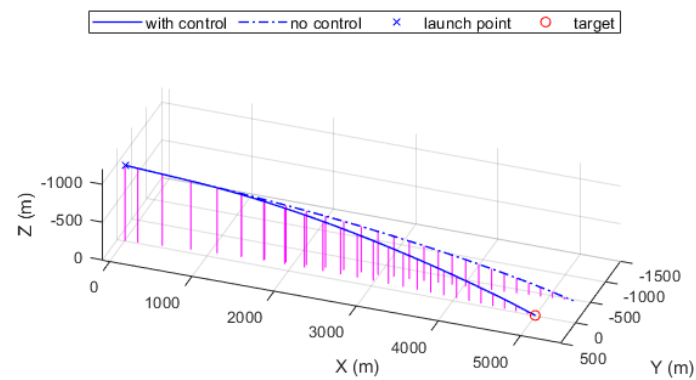
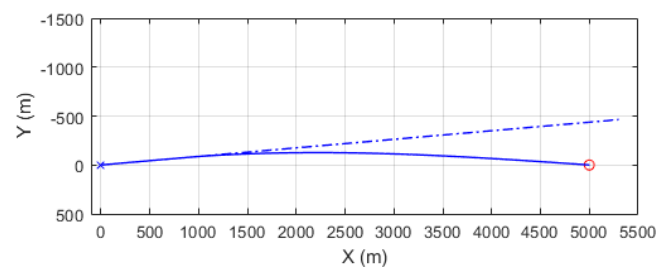


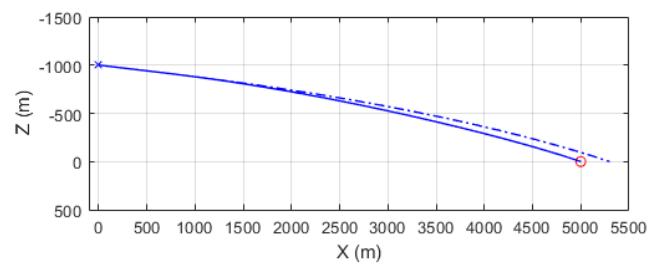
Fig 8 Analysis of the 50% Circular Error Probable (CEP)



(a) 3D trajectory of the rocket



(b) Trajectory projection on the XY plane



(c) Trajectory projection on the XZ plane

Fig 9 Shows an example of the trajectory from the simulation of a launch, assuming an angle of $\Delta\psi = -5^\circ$ and $\Delta\theta = 5^\circ$, with a distance of 5 km between the rocket and the target. The resulting miss distance is 0.0525 m

4. Conclusion

This paper presents a method for controlling the direction of the 2.75-inch WAFAR using a combination of pole placement and PI control to regulate the thrust output of the reaction thruster output in the guidance section. The research results demonstrate that the direction of the rocket can be accurately controlled to reach the target, and it performs well even when subjected to disturbances from the environment and noise from the system itself. This highlights the reliability of the simulation results, which were conducted using a 6-DOF model and tested with the rocket's nonlinear dynamics equations. Although the control system generates signals that are not perfectly smooth, it does not cause the rocket to lose stability during flight and provides a fast response, resulting in higher accuracy. The proposed control method is straightforward and practical for real-world applications due to its simple calculations, which do not impose a heavy processing load on the controller.

Overall, the PI control combined with pole placement can effectively be used to control the direction of the rocket under normal operating conditions. However, this approach may lack flexibility compared to more modern control techniques, especially when the rocket dynamics change significantly, which can lead to a noticeable drop in accuracy. For this study, which focuses on a 2.75-inch rocket that wasn't originally designed for guided flight, the proposed control method is sufficient to improve flight accuracy under typical usage scenarios.

However, when implementing the actual control system, the limitations of the various components, particularly the reaction thruster in terms of both structure and specific dynamics of the reaction thrust, should be carefully considered.

5. References

- [1] BAE Systems, “Advanced precision kill weapon system (APKWS).”[Online]. Available: <https://www.baesystems.com> (Accessed: August. 1, 2023).
- [2] M. C. Mickle, and J. J. Zhu, “Skid to turn control of the APKWS missile using trajectory linearization technique,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2001, pp.3346-3351.
- [3] W. M. Wonnacott, “*Modeling in the design and analysis of a hit-to-kill rocket guidance kit*,” M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 1997.
- [4] P. H. Zipfel, “CADAC: Multi-use architecture for constructive aerospace simulations,” *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 129-145, April 2012.
- [5] P. H. Zipfel, *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*, 2nd ed. Reston, VA, USA: AIAA, 2007.

- [6] M. Wang, G. Li, L. Zhao, and L. Wei, "Roll controller design for miniature air-to-ground missile based on ADRC," in *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, Shanghai, China, 2021, pp. 2079–2084.
- [7] J. Zhou, W. Li, Q. Xia, and H. Jiang, "Robust missile autopilot design based on dynamic surface control," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 160–171, February 2023.
- [8] P. V. Rao, V. Murthy Arikapalli, S. Bhowmick, and R. Ayyagari, "Missile longitudinal dynamics control design using pole placement and LQR methods," *Defence Science Journal*, vol. 71, no. 4, pp. 477-485, September 2021.
- [9] J. Liu, K. Guo, J. Zhu, H. Wang, and J. Li, "Static unstable missiles: Design and simulation using an acceleration feedback autopilot structure," in *43rd Chinese Control Conference (CCC)*, Kunming, China, 2024, pp. 3721-3728.
- [10] R. Bhattacharjee and S. Mukherjee, "Performance analysis of a missile guidance and control system model for precise target tracking," in *IEEE 3rd World Conference on Applied Intelligence and Computing (AIC)*, Gwalior, India, 2024, pp. 1471-1476.
- [11] M. Zhou, D. Mao, M. Zhang, L. Guo, and M. Gong, "A hybrid control with PID-improved sliding mode for flat-top of missile electromechanical actuator systems," *Sensors*, vol. 18, no. 12, December 2018.
- [12] K. Yang, "A novel PID tuning method for the missile overload control," in *2nd International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR)*, Shanghai, China, 2022, pp. 86-89.
- [13] D. Zhe, C. Jiabin, S. Chunlei, and C. Hongye, "Design of longitudinal control system for target missiles based on fuzzy adaptive PID control," in *29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Chongqing, China, 2017, pp. 398-402.

การเพิ่มความมั่นคงของข้อมูลและการสื่อสารด้วยเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ Enhancing Data and Communication Security with Key Recovery Technology

จำรูญ จันทร์กฤษณ์¹ และ กนกวรรณ กันยะมี^{2*}

^{1, 2}สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Jumroon Chankulchorn¹ and Kanokwan Kanyamee^{2*}

^{1, 2}Information Technology Program, Uttaradit Rajabhat University

kanokwan@uru.ac.th

Received 03 March 2025

Revised 29 April 2025

Accepted 14 May 2025

บทคัดย่อ

ในยุคดิจิทัลการสื่อสารผ่านระบบเครือข่าย กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนกิจกรรมหลากหลายด้านของมนุษย์และสังคม โดยมีสิ่งที่ต้องตระหนักอย่างยิ่งคือ ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล และความน่าเชื่อถือของการสื่อสาร ดังนั้นเพื่อปกป้องข้อมูลจากความเสียหายที่มีผลกระทบต่อความมั่นคงปลอดภัย เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ (Key Recovery Technology) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างและยกระดับความน่าเชื่อถือ พร้อมทั้งเพิ่มความเชื่อมั่นในการสื่อสาร โดยเฉพาะในกรณีกุญแจลับ (Secret Key) ที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลสูญหาย หรือไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งมีผลให้เข้าถึงข้อมูลไม่ได้ อาจสร้างความเสียหายทั้งในระดับบุคคล องค์กร และโครงสร้างพื้นฐาน เช่น การสูญเสียหลักฐานทางธุรกิจ ข้อมูลส่วนบุคคล หรือการหยุดชะงักของระบบบริการสาธารณะ เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีนี้ช่วยในการกู้คืนกุญแจลับ ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างปลอดภัย โดยไม่กระทบต่อความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังสนับสนุนการดำเนินงานตามนโยบายด้านกฎหมาย นั่นคือการเข้าถึงข้อมูลที่อยู่ในข่ายต้องสงสัยเพื่อการตรวจสอบอย่างเหมาะสม โปร่งใส รวมถึงการป้องกันการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต ช่วยลดความเสี่ยงจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ในรูปแบบต่าง ๆ จึงถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ส่งเสริมสนับสนุนความต่อเนื่องของธุรกิจและเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในสังคมดิจิทัลอย่างยั่งยืน บนพื้นฐานของการรักษาความลับและความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน

คำสำคัญ: ความมั่นคงปลอดภัย, ข้อมูล, การกู้คืนกุญแจ, กุญแจลับ

Abstract

In the digital era, network-based communication has become a cornerstone of diverse human and societal activities. This evolution has brought to the forefront the critical importance of information security and communication reliability. To protect sensitive data from threats that

could compromise its integrity and availability, Key Recovery Technology (KRT) plays a pivotal role in enhancing trust and resilience in digital communication systems. It is particularly essential in cases where secret keys used for data encryption are lost or become unusable, which can result in a complete loss of access to encrypted information. Such incidents may result in significant damage at individual, organizational, and infrastructural levels, including the loss of business-critical evidence, breaches of personal data, or the disruption of essential public services. KRT enables the recovery of secret keys in a secure and privacy-preserving manner, ensuring that data remains accessible without violating user confidentiality. Moreover, this technology supports compliance with legal and regulatory frameworks by allowing authorized access to data under investigation, ensuring transparency and accountability while preventing unauthorized access. Therefore, KRT serves as a key enabler of robust information security, supporting business continuity and fostering sustainable trust in the digital ecosystem by upholding the principles of confidentiality, integrity, and user privacy.

Keywords: Security, Data, Key Recovery, Secret Key

1. บทนำ

ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสาร ถือเป็นรากฐานสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการดำเนินชีวิตในยุคดิจิทัล ซึ่งเป็นยุคที่ข้อมูลกลายเป็นทรัพยากรที่มีมูลค่าสูง ใช้ในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ สังคม และเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์วางแผนการพัฒนากองทัพและประเทศชาติ ในขณะเดียวกันข้อมูลก็มีความเสี่ยงที่จะถูกโจมตี เข้าถึง ตลอดจนถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต เช่น การขโมย การปลอมแปลง หรือการละเมิดความเป็นส่วนตัว ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวบุคคล องค์กร และโครงสร้างพื้นฐานของสังคม เช่น ระบบพลังงาน การคมนาคม และสาธารณสุข อาจส่งผลให้การดำเนินงานล้มเหลว หยุดชะงัก หรือถูกแทรกแซง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศในวงกว้าง ดังนั้นการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสาร จึงช่วยเสริมสร้างความไว้วางใจในระบบดิจิทัล ป้องกันการหยุดชะงักของระบบสารสนเทศที่สำคัญ อย่างไรก็ตามการให้ความสำคัญในเรื่องดังกล่าวจึงไม่ใช่เพียงปกป้องทรัพยากรที่มีค่า แต่ยังเป็นการรักษาเสถียรภาพและความยั่งยืนบนโลกดิจิทัล ที่ต้องพึ่งพาข้อมูลในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ

เทคโนโลยีการเข้ารหัสข้อมูล (Cryptography Technology) [1] เป็นหนึ่งในกลไกที่สำคัญของการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ด้วยการใช้อุญแจลับ (Secret Key) ในการเข้ารหัสข้อมูล (Data Encryption) ซึ่งเป็นการแปลงข้อความต้นฉบับ (Plaintext) ให้อยู่ในรูปแบบที่ซับซ้อนและไม่สามารถเข้าใจได้ (Ciphertext) เพื่อปกป้องข้อมูลจากบุคคลที่สามหรือผู้ที่ไม่มีอำนาจ จะมีความปลอดภัย (Sender - Receiver) เท่านั้นที่มีสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลโดยใช้กุญแจในการถอดรหัส เทคโนโลยีนี้ถูกนำมาใช้ในหลายบริบท เช่น การปกป้องข้อมูลส่วนบุคคล การรักษาความลับของธุรกรรมทางการเงิน ตลอดจนการสื่อสารที่ปลอดภัยในองค์กร เป็นต้น ฉะนั้นจากการที่ข้อมูลจำนวนมากถูกเข้ารหัสเพื่อป้องกันการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต กุญแจลับจึงเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล หากกุญแจลับสูญหายหรือใช้งานในการถอดรหัสไม่ได้ จะส่งผลให้ไม่สามารถเปิดอ่านข้อมูลสำคัญได้เช่นกัน ทำให้

ข้อมูลถูกล็อกอย่างถาวร เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการคิดค้นกระบวนการที่ปลอดภัยในการกู้คืนกุญแจลับ เรียกว่า เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ (Key Recovery Technology) [2] เป็นการผสานระบบการกู้คืนกุญแจเข้ากับการเข้ารหัสลับ เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่ถูกรหัสได้ โดยไม่ละเมิดความปลอดภัยหรือความเป็นส่วนตัว ส่งผลให้สามารถรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลได้ในทุกมิติ อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนความต่อเนื่องในการดำเนินงาน รองรับความพร้อมใช้งานของข้อมูล และลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการโจมตีหรือความผิดพลาดได้อย่างยั่งยืน โดยวัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ มี 2 ประการด้วยกันคือ (1) เพื่อกู้คืนกุญแจลับที่สูญหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ และ(2) เพื่อรองรับการเข้าถึงข้อมูลที่ต้องสงสัยเพื่อการตรวจสอบภายใต้ นโยบายและกฎหมาย [3]

2. ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสาร

ความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสารเป็นฐานสำคัญของความปลอดภัยในโลกยุคดิจิทัล โดยมุ่งเน้นการปกป้องข้อมูลให้มั่นคงปลอดภัยจากการเข้าถึง ทำลาย หรือถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขจากผู้ที่ไม่ได้รับสิทธิ์ และทำให้มั่นใจว่าข้อมูลสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกันก็เป็นแนวทางในการปกป้องข้อมูลจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ โดยอาศัยหลักการของวิทยาการเข้ารหัสลับข้อมูล ซึ่งจะทำให้การสื่อสารมีความมั่นคงปลอดภัย และลดความเสี่ยงจากการถูกแทรกแซงหรือโจมตีทางไซเบอร์

แนวคิดหลักของความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสาร [4] มักเรียกย่อ ๆ ว่า CIA ซึ่งได้รับการนิยามและใช้อ้างอิงอย่างแพร่หลายในเอกสารมาตรฐานของ NIST เช่น NIST Special Publication 1800 Series [5] ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ

2.1 การรักษาความลับ (Confidentiality: C) คือ การป้องกันไม่ให้บุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาตเข้าถึงข้อมูล ด้วยการใช่วิธีการเข้ารหัส (Encryption) และควบคุมสิทธิ์การเข้าถึง (Access Control)

2.2 ความถูกต้องของข้อมูล (Integrity: I) คือ การป้องกันข้อมูลไม่ให้ถูกเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข โดยไม่ได้รับอนุญาต ด้วยการใช้ฟังก์ชันแฮช (Hashing) ลายมือชื่อดิจิทัล (Digital Signature) และ การตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของข้อมูล (Checksums) เป็นต้น

2.3 ความพร้อมใช้งาน (Availability: A) คือ การทำให้ระบบหรือข้อมูล สามารถเข้าถึงและใช้งานได้เมื่อผู้ใช้ต้องการ ซึ่งสามารถใช้วิธีสำรองข้อมูล (Backup) การปรับสมดุลโหลด (Load Balancing) และ การทำแผนกู้คืนระบบจากภัยพิบัติ (Disaster Recovery Plan) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเข้ารหัสลับจะเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยปกป้องข้อมูลและการสื่อสารให้มั่นคงปลอดภัย จากการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต แต่ก็มีประเด็นที่ต้องให้ความสนใจนั่นคือ หากกุญแจลับที่ใช้ในการเข้ารหัส สูญหายหรือถูกทำลาย จะส่งผลถึงข้อมูลที่เข้ารหัส คือทำให้ไม่สามารถถอดรหัสได้ เหตุการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความมั่นคงปลอดภัยและความต่อเนื่องในการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการช่วยให้ผู้ใช้หรือองค์กร สามารถกู้คืนกุญแจที่สูญหายได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว นอกจากนี้ยังช่วยในการรักษาข้อมูลที่เป็นความลับ มีการบริหารจัดการกุญแจที่สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัย ตลอดจนสนับสนุนรองรับการกู้คืนข้อมูลเพื่อวัตถุประสงค์ทางกฎหมาย และการสืบสวนทางไซเบอร์

3. เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

3.1 ความเป็นมาและวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับเกิดขึ้นจากความต้องการจัดเก็บกุญแจลับเพื่อสำรองไว้ในที่ปลอดภัย และสามารถใช้ในการกู้คืนกุญแจกรณีที่กุญแจหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ รองรับการเข้าถึงข้อมูลต้องสงสัยที่สื่อสารบนระบบเครือข่ายอย่างถูกต้องตามกฎหมาย ซึ่งเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญของการรักษาความปลอดภัยของระบบสารสนเทศ ความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ เริ่มชัดเจนในยุคที่การเข้ารหัสลับเริ่มถูกใช้อย่างแพร่หลาย ในหน่วยงานรัฐบาล และองค์กรขนาดใหญ่

โดยในช่วงแรกการบริหารจัดการกุญแจลับอยู่ในรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก โดยใช้การเก็บรักษากุญแจไว้กับบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือหน่วยงานกลางของรัฐบาล [6] ซึ่งเป็นวิธีที่มีความเสี่ยงสูงในด้านความมั่นคงปลอดภัย เช่น กุญแจที่จัดเก็บสำรองไว้ถูกขโมยหรือมีการเข้าถึงโดยผู้ประสงค์ร้าย ความเสี่ยงด้านความลับของกุญแจถูกเปิดเผย ตลอดจนการผูกขาดกุญแจโดยบุคคลที่สาม และเสี่ยงต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้น เป็นต้น จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้การจัดการกุญแจรูปแบบเดิมไม่มีความปลอดภัย จึงเกิดการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถแบ่งตามยุคสมัยได้ 7 ยุค ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ยุคของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจ

ยุคของเทคโนโลยี	รายละเอียด
ยุคที่ 1 การจัดการกุญแจแบบพื้นฐาน (ก่อนปี 1970)	ยุคเริ่มต้นของการเข้ารหัส ระบบการกู้คืนกุญแจยังไม่มีพัฒนาอย่างเป็นรูปธรรมชัดเจน กุญแจลับถูกจัดเก็บในแบบที่ไม่ปลอดภัย เช่น บันทึกลงในหน่วยความจำ หรือเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุม หากสูญหายจะไม่สามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้ และมีความเสี่ยงจากการถูกโจมตี
ยุคที่ 2 แนวคิดพื้นฐานของ Key Escrow (ช่วงทศวรรษ 1970-1980)	เริ่มมีการนำเสนอแนวคิด Key Escrow [6] ในเชิงวิชาการ กล่าวคือ การฝากกุญแจไว้กับบุคคลที่สามที่เชื่อถือได้ (Trusted Third Party: TTP) เพื่อใช้ในกรณีฉุกเฉิน แนวคิดยังอยู่ในช่วงต้นทางทฤษฎี ยังไม่มีการดำเนินเชิงนโยบายอย่างเป็นทางการ
ยุคที่ 3 การผลักดันนโยบาย Key Escrow โดย ภาครัฐ (ช่วงปี 1990)	รัฐบาลสหรัฐฯ เสนอให้ใช้ระบบเข้ารหัส ที่สามารถให้รัฐเข้าถึงข้อมูลได้โดยชอบด้วยกฎหมายผ่าน TTP เพื่อความมั่นคงปลอดภัยภายใน เช่น โครงการ Clipper Chip และ มาตรฐาน Escrowed Encryption Standard (EES) [7] แต่ได้รับกระแสต่อต้านจากภาคประชาชน ว่าเป็นการละเมิดความเป็นส่วนตัว เช่น Howard S. Dakoff [8] ที่ได้ให้ความเห็นว่าการดำเนินการดังกล่าวต้องอยู่ภายใต้กรอบของกฎหมายที่มีความชัดเจน
ยุคที่ 4 การใช้เอเจนต์และศูนย์กลางในการกู้ คืนกุญแจ (ช่วงปลายปี 1990)	เข้าสู่ยุคที่การกู้คืนกุญแจลับถูกบูรณาการเข้ากับการเข้ารหัสที่มีความซับซ้อนมากขึ้น มีการใช้ศูนย์กลางการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Center: KRC) ร่วมกับเอเจนต์กู้คืนกุญแจ (Key Recovery Agent: KRA) โดยอาศัยการแบ่งปันความลับ (Secret Sharing) [9] ซึ่งเป็นการทำงานแบบใช้หลายเอเจนต์ในการกู้คืนกุญแจ (Multiple Key Recovery Agent: M-KRA) [10] เพื่อลดความเสี่ยงจากการผูกขาดกุญแจแต่เพียงผู้เดียว
ยุคที่ 5 การห่อหุ้มกุญแจลับ	เกิดแนวคิดการสร้างฟิลด์ในการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Field: KRF) และการห่อหุ้มกุญแจลับ (Secret Key Encapsulation) [11] ที่ทำงาน

ยุคของเทคโนโลยี	รายละเอียด
(ช่วงปี 2000)	ภายใต้เทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานกุญแจสาธารณะ (Public Key Infrastructure: PKI) [12] เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยและง่ายในการจัดการมากขึ้น
ยุคที่ 6 การกู้คืนแบบกระจายโดยหลายเอเจนต์ แบบกระจายศูนย์ หรือไม่พึ่งพา ศูนย์กลาง (ช่วงปี 2010)	พัฒนาแนวคิดการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ (Multiple Key Recovery Agent: M-KRA) แบบกระจายศูนย์ (Decentralized) [13] ลดความเสี่ยงจาก Single Point of Failure และเพิ่มความยืดหยุ่นในการกู้คืน
ยุคที่ 7 ยุคควอนตัมและอนาคต (ปี 2020 เป็นต้นไป)	เตรียมรับมือภัยคุกคามจากคอมพิวเตอร์ควอนตัม โดยใช้ Post-Quantum Cryptography (PQC) [14] เพื่อให้ระบบกู้คืนกุญแจสามารถรองรับภัยคุกคามในอนาคตได้อย่างยั่งยืน โดยใช้อัลกอริทึมที่มีความแข็งแกร่ง เช่น การเข้ารหัสลับแบบสมมาตรด้วย Kyber และ สร้างลายมือชื่อดิจิทัลด้วย Dilithium กับ Falcon [15]

3.2 ความหมายและความสำคัญของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

3.2.1 ความหมายของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ (Key Recovery Technology) หมายถึง ระบบหรือกระบวนการที่ออกแบบเพื่อให้สามารถเข้าถึงหรือกู้คืนกุญแจลับ ในกรณีที่กุญแจลับสูญหายหรือเสียหาย ส่งผลให้ไม่สามารถใช้งานถอดรหัสได้ และรองรับการกู้คืนกุญแจลับเพื่อการเข้าถึงข้อมูลที่ต้องการตรวจสอบอย่างถูกต้องตามกฎหมาย โดยใช้กลไกในการบริหารจัดการกุญแจที่มีความมั่นคงปลอดภัยสูง ยืดหยุ่น สามารถเข้าถึงข้อมูลสำคัญได้ในกรณีฉุกเฉิน และยังคงรักษาความเป็นส่วนตัว ป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต

3.2.2 ความสำคัญของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการรักษาความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลในยุคดิจิทัล เนื่องจากช่วยให้ผู้ใช้ใช้งาน องค์กร หน่วยงานต่าง ๆ สามารถรับมือกับความเสียหายจากการสูญหายของกุญแจ และเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการกับภัยคุกคามที่มีต่อข้อมูลบนไซเบอร์ อีกทั้งยังช่วยสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้ระบบเครือข่ายดิจิทัล และส่งเสริมความยั่งยืนของการใช้เทคโนโลยี ทั้งนี้สามารถสรุปถึงความสำคัญได้ 6 ประการหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 ช่วยกู้คืนกุญแจลับ ลดความเสี่ยงการสูญหายของกุญแจ

การกู้คืนกุญแจลับเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ (1) กุญแจลับสูญหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ และ (2) รองรับการใช้งานข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมาย กล่าวคือเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับช่วยให้เกิดกระบวนการกู้คืนกุญแจเมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวได้อย่างมั่นคงปลอดภัย (Security) และคงความเป็นส่วนตัว (Privacy) ของผู้ใช้ใช้งาน ลดความเสี่ยงจากการสูญหายของกุญแจลับ

3.2.2.2 สนับสนุนความต่อเนื่องของธุรกิจ

ช่วยลดความเสี่ยงที่ทำให้ธุรกิจหยุดชะงัก ทำให้องค์กรสามารถกู้คืนข้อมูลที่เข้ารหัสได้ในภาวะฉุกเฉิน เช่น ข้อมูลถูกทำลายจากผู้ประสงค์ร้าย หรือเกิดความผิดพลาดในการจัดการกุญแจ เป็นต้น

3.2.2.3 สร้างความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลเมื่อเกิดการโจมตีทางไซเบอร์

เนื่องจากการมีกลไกการกู้คืนกุญแจที่แข็งแกร่ง ช่วยให้สามารถรับมือกับภัยคุกคามได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การโจมตีแบบแรนซัมแวร์ (Ransomware) ที่มีการเข้ารหัสข้อมูลไว้ หากมีระบบกู้คืนกุญแจที่ดี ก็สามารถกู้คืนข้อมูลหรือปลดล็อกข้อมูลได้ โดยไม่จำเป็นต้องชำระเงินค่าไถ่ หรือยอมจำนนต่อผู้โจมตี

3.2.2.4 ช่วยจัดการการกู้คืนระบบในช่วงเวลาวิกฤต

ในกรณีที่ระบบเกิดความล้มเหลว เทคโนโลยีนี้ช่วยให้สามารถฟื้นฟูหรือกู้คืนข้อมูล ที่มีการเข้ารหัสไว้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

3.2.2.5 ส่งเสริมความยั่งยืนของการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ เพิ่มความไว้วางใจในระบบดิจิทัล

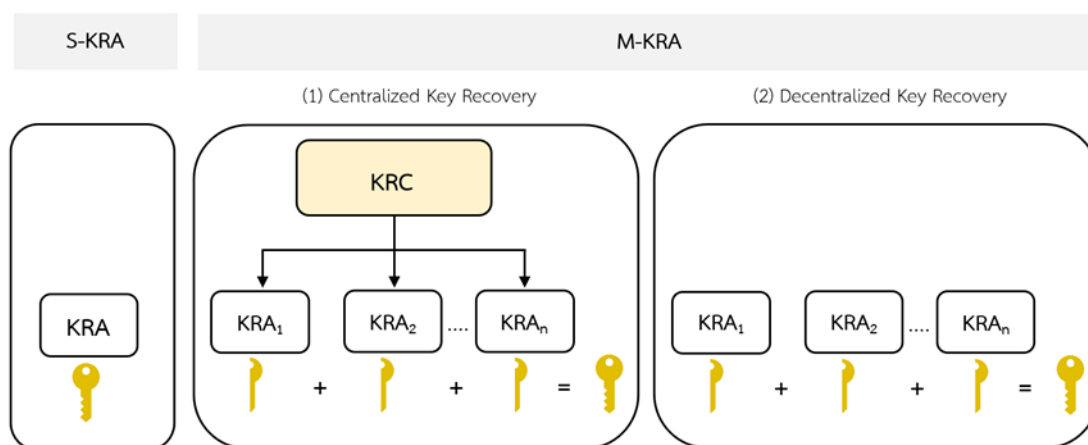
กล่าวคือเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับที่มีประสิทธิภาพ ช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้งานในบริษัทต่าง ๆ ว่าข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจะเป็นความลับ และมีหลักการบริหารจัดการที่มีความปลอดภัย แม้ในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงต่อภัยคุกคาม

3.2.2.6 สนับสนุนการปฏิบัติตามข้อกำหนดและกฎหมาย

การอุตสาหกรรมในหลายประเทศ มีกฎหมายหรือข้อกำหนดเกี่ยวกับการจัดการข้อมูล เช่น กฎหมายการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลของพลเมืองสหภาพยุโรป หรือ EU (General Data Protection Regulation : GDPR) ไม่ว่าจะเป็นการจัดการข้อมูลของประเทศสมาชิกภายในหรือภายนอก EU หรือกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (Personal Data Protection Act : PDPA) ซึ่งเมื่อมีกระบวนการกู้คืนกุญแจ จะช่วยให้สามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดดังกล่าว ที่ให้ความสำคัญกับการปกป้องข้อมูลส่วนบุคคลได้ง่าย สะดวก ปลอดภัย และมีความโปร่งใสมากยิ่งขึ้น

3.3 รูปแบบการกู้คืนกุญแจลับ

จากการศึกษาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ สามารถแบ่งตามลักษณะการกู้คืนกุญแจได้ 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 รูปแบบการกู้คืนกุญแจลับ

3.3.1 รูปแบบที่ 1 การกู้คืนกุญแจแบบใช้เอเจนต์เดี่ยว (Single Key Recovery Agent: S-KRA)

กระบวนการทำงานของ S-KRA จะใช้เพียง 1 เอเจนต์ หรือใช้เอเจนต์เดี่ยว (Single Key Recovery Agent: S-KRA) ในการกู้คืนกุญแจ [16] เป็นการพัฒนาระบบที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มแรก มีกระบวนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งต่อมาเกิดภัยคุกคามทางไซเบอร์รูปแบบใหม่ ๆ และมีระดับความรุนแรงที่สามารถสร้างความเสียหายต่อระบบมากขึ้น [17] เช่น ความเสี่ยงจากความล้มเหลวในรูปแบบ Single Point of Failure (SPOF) การปฏิเสธการให้บริการ

(Denial of Service : DoS) หรือแม้กระทั่งการสมรู้ร่วมคิดของเอเจนต์ (Conspiracy) เป็นต้น ต่อมาการพัฒนาเทคโนโลยีในช่วงหลัง จึงได้ออกแบบส่วนการทำงานที่มีความมั่นคงปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น ด้วยการให้เอเจนต์หลายเอเจนต์ (Multiple Key Recovery Agent : M-KRA) เก็บรักษาส่วนประกอบของกุญแจลับ และร่วมกันกู้คืน ทั้งนี้เพื่อลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ S-KRA

3.3.2 รูปแบบที่ 2 การกู้คืนกุญแจแบบใช้หลายเอเจนต์ (Multiple Key Recovery Agent : M-KRA)

M-KRA จะใช้เอเจนต์ตั้งแต่ 2 เอเจนต์ขึ้นไป ในการจัดเก็บส่วนประกอบของกุญแจลับ และร่วมกันกู้คืนกุญแจ โดยกระบวนการทำงานของ M-KRA มี 2 รูปแบบคือ

(1) M-KRA ที่อาศัย KRC หรือเรียกว่า การกู้คืนกุญแจแบบศูนย์กลาง (Centralized Key Recovery) [18] ในรูปแบบนี้ KRC มีหน้าที่ติดต่อประสานงานระหว่างเอเจนต์กู้คืนกุญแจ เพื่อทำหน้าที่ร่วมกันในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ

(2) M-KRA ที่ไม่อาศัย KRC หรือเรียกว่า การกู้คืนกุญแจแบบกระจายศูนย์ (Decentralized Key Recovery) [13] ในรูปแบบนี้ KRA จะทำงานร่วมกับผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจ โดยไม่มี KRC เป็นตัวกลางในการติดต่อประสานงาน

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการกู้คืนกุญแจแบบใช้หลายเอเจนต์ทั้งสองรูปแบบ ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการกู้คืนกุญแจแบบใช้หลายเอเจนต์

รูปแบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
M-KRA ที่อาศัยศูนย์กลางในการกู้คืนกุญแจ	1. ระบบทำงานไม่ซับซ้อน 2. ยากต่อการปลอมแปลงของ KRA ในกลุ่มการกู้คืน	1. เมื่อ KRC เกิดข้อขัดข้องเสียหาย หรือได้รับความเสียหายจากภัยคุกคาม จะส่งผลให้ระบบล้มเหลวไม่สามารถให้บริการได้ (Single Point of Failure: SPOF) 2. จำเป็นต้องใช้งบประมาณในการบริหารจัดการ KRC ค่อนข้างสูง
M-KRA ที่ไม่อาศัยศูนย์กลางในการกู้คืนกุญแจ	1. ระบบสามารถลดความเสี่ยงของการเกิดภัยคุกคามในรูปแบบ SPOF หรือ DoS 2. ไม่มีต้นทุนในส่วนการบริหารจัดการ KRC	1. การทำงานของระบบจะมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น 2. จำเป็นต้องมีฟังก์ชันการพิสูจน์ตัวตนจริงของ KRA ในกลุ่มการกู้คืนกุญแจที่รัดกุม

จากตารางที่ 2 สรุปได้ว่าการเลือกรูปแบบการกู้คืนกุญแจลับนั้น ขึ้นอยู่กับบริบทความจำเป็น และความต้องการความมั่นคงปลอดภัยขององค์กร หากเป็นองค์กรที่ต้องการความมั่นคงสูงเหมาะกับการใช้ M-KRA แบบกระจายศูนย์ (Decentralized) เพื่อลดความเสี่ยงจากการโจมตี ทั้งนี้ต้องมีกระบวนการพิสูจน์ตัวตนจริงที่รัดกุม ซึ่งอาจใช้แนวคิดของ Zero Trust Security (ZTS) [19] ที่ไม่ไว้วางใจผู้ใช้หรืออุปกรณ์ใด ๆ โดยอัตโนมัติ แม้ว่าจะอยู่ในเครือข่ายองค์กรเดียวกัน แต่จะมีการตรวจสอบตัวตนและสิทธิ์การร้องขอการกู้คืนกุญแจทุกครั้ง หรือใช้หลักการ Multi-Factor Authentication (MFA) [20] ซึ่งเป็นการยืนยันตัวตนแบบหลายขั้นตอน เพื่อให้แน่ใจว่าผู้ใช้มีสิทธิ์เท่านั้นที่สามารถกู้คืนกุญแจได้

3.4 องค์ประกอบของเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับมีองค์ประกอบ 3 ส่วนที่สำคัญในการทำงานร่วมกัน เพื่อกู้คืนกุญแจลับและรองรับการเข้าถึงข้อมูล โดยมีโครงสร้างของแต่ละองค์ประกอบดังนี้

3.4.1 ส่วนความมั่นคงปลอดภัยของผู้ใช้งาน (User Security Component: USCn) มีบทบาทและหน้าที่ในการจัดการเรื่องความสามารถในการเข้ารหัสลับและถอดรหัสลับข้อมูล รวมทั้งสนับสนุนการกู้คืนกุญแจ ซึ่งจะมีการแนบฟิลด์ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ (Data Recovery Field: DRF หรือ Key Recovery Field: KRF) ไปกับข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสลับแล้ว (Ciphertext) USCn ทำหน้าที่เป็นส่วนที่เชื่อมต่อผู้ใช้งานกับระบบกู้คืนกุญแจ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่เข้ารหัสสามารถกู้คืนได้อย่างปลอดภัย

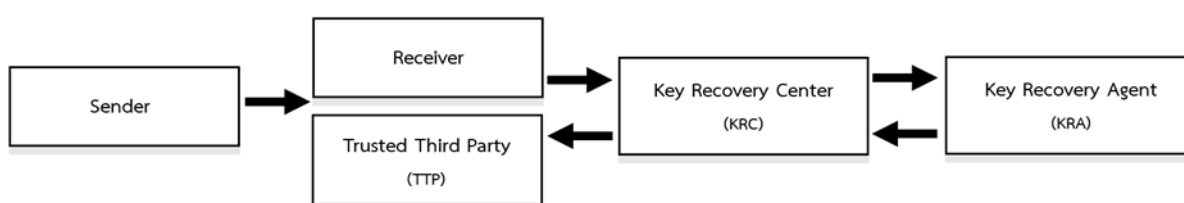
3.4.2 ส่วนหน่วยงานกู้คืนกุญแจ (Recovery Agent Component: RACn) ทำหน้าที่จัดการกุญแจลับ รวมถึงการเก็บรักษาและการกู้คืนกุญแจในกรณีที่กุญแจสูญหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ ประกอบด้วยศูนย์กลางการกู้คืนกุญแจ (KRC) และ/หรือ หน่วยงานกู้คืนกุญแจ (KRA) อาจมีการใช้ระบบการบริหารจัดการใบรับรองกุญแจสาธารณะ (Public Key Certificate) หรือใช้โครงสร้างพื้นฐานการบริหารจัดการกุญแจทั่วไป (General Key Management Infrastructure) ร่วมด้วยเพื่อสนับสนุนการดำเนินงาน

3.4.3 ส่วนการกู้คืนข้อมูล (Data Recovery Component: DRCn) ประกอบด้วยอัลกอริทึม โปรโตคอล และกระบวนการที่ช่วยให้ได้กุญแจลับจาก DRF หรือ KRF ที่แนบมากับข้อมูลเข้ารหัส เพื่อนำกุญแจที่ได้ไปถอดรหัสลับข้อมูล โดยกระบวนการนี้จะอนุญาตเฉพาะผู้ที่มีสิทธิ์ในการกู้คืนกุญแจเท่านั้น

3.5 ส่วนประกอบของกระบวนการการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ เป็นการเข้ารหัสด้วยกุญแจลับที่อาศัยความสามารถของการสำรอง (Backup) ข้อมูลบางส่วนของกุญแจ เพื่อนำมาใช้ในการถอดรหัสลับ โดยอาศัยความไว้วางใจ (Trust) ยอมให้สิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูลดังกล่าวกับ TTP ซึ่งกระบวนการกู้คืนกุญแจลับต้องดำเนินการภายใต้นโยบายหรือกฎหมายที่แน่นอน บุคคลที่สามารถร้องขอการกู้คืนกุญแจและมีสิทธิ์เข้าถึงข้อมูลกุญแจ คือผู้ที่เป็นเจ้าของกุญแจ หรือหน่วยงาน/บุคลากรของรัฐบาลที่มีสิทธิ์ในการตรวจสอบข้อมูลที่ส่งผ่านระบบเครือข่ายโดยชอบด้วยกฎหมาย

กระบวนการกู้คืนกุญแจลับ ที่ทำงานภายใต้เทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานกุญแจสาธารณะ (Public Key Infrastructure : PKI) มีส่วนประกอบ 4 ส่วนหลัก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของกระบวนการการกู้คืนกุญแจลับ

ส่วนที่ 1 ผู้ส่ง (Sender) มีหน้าที่

- (1) สร้างข้อมูลต้นฉบับ เพื่อส่งให้กับผู้รับ
- (2) สร้างฟิลด์ที่เก็บ KRF เพื่อใช้ในการกู้คืนกุญแจในภายหลัง
- (3) แนบฟิลด์ KRF เข้ากับข้อความต้นฉบับ ส่งไปยังผู้รับทุกครั้งของการสนทนาสื่อสาร

ส่วนที่ 2 ผู้รับ (Receiver)/TTP ในกรณีผู้รับกุญแจลับสูญหายหรือไม่สามารถใช้ถอดรหัสข้อความต้นฉบับได้ หรือ TTP ต้องการกุญแจในการถอดรหัสข้อมูลเพื่อการตรวจสอบ มีหน้าที่

(1) ร้องขอการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ หรือ การกู้คืนกุญแจลับ ไปยัง KRC หรือ KRA ขึ้นอยู่กับรูปแบบการให้บริการ

(2) บางครั้งอาจทำหน้าที่คำนวณข้อมูลกุญแจลับ เมื่อได้รับข้อมูลส่วนประกอบของกุญแจครบถ้วนจาก KRC หรือ KRA

ส่วนที่ 3 ศูนย์กลางในการกู้คืนกุญแจ (KRC) มีหน้าที่

(1) บริการจัดการกุญแจ และ KRA กล่าวคือ เป็นศูนย์กลางในการกู้คืนกุญแจ และเชื่อมต่อประสานงานระหว่างผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจ กับ KRA

(2) ทำการรวบรวมส่วนประกอบของกุญแจลับ หรือ กู้คืนกุญแจ ทั้งนี้เป็นไปตามฟังก์ชันการให้บริการ

ส่วนที่ 4 เอเจนต์ที่ให้บริการกู้คืนกุญแจ (KRA) มีหน้าที่

(1) กู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับ เมื่อได้รับการร้องขอการกู้คืนกุญแจจากผู้ร้องขอ

(2) จัดส่งส่วนประกอบของกุญแจที่ถูกต้องให้ผู้ร้องขอ เพื่อทำการกู้คืนกุญแจในขั้นตอนสุดท้าย

3.6 ขั้นตอนการกู้คืนกุญแจลับ

กระบวนการกู้คืนกุญแจลับเป็นขั้นตอนสำคัญในระบบความมั่นคงปลอดภัยของสารสนเทศ เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่เข้ารหัสไว้ได้ แม้ในกรณีที่กุญแจสูญหาย หรือมีความจำเป็นต้องเข้าถึงข้อมูลตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ต้องมีมาตรการควบคุมที่เหมาะสม เพื่อจะไม่เป็นการละเมิดความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน โดยการกู้คืนกุญแจลับ มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.6.1 การเตรียมข้อมูลและการสร้างฟิลด์ที่จัดเก็บ KRF (หน้าที่ของผู้ส่ง) ทั้งนี้ทำงานบนพื้นฐานของ PKI มีลำดับดังนี้

3.6.1.1 เตรียมข้อมูลต้นฉบับ (Plaintext) และสร้าง KRF เพื่อรองรับการกู้คืนกุญแจเมื่อจำเป็น

3.6.1.2 ส่งข้อมูลต้นฉบับไปพร้อมกับฟิลด์ KRF

3.6.2 การร้องขอการกู้คืนกุญแจ (หน้าที่ของผู้รับ หรือหน่วยงานที่มีสิทธิ์ในการเข้าถึงกุญแจ)

3.6.2.1 หากกุญแจสูญหายหรือไม่สามารถใช้บริการได้ จะมีการร้องขอการกู้คืนกุญแจ

3.6.2.2 ส่ง KRF ไปยัง KRC หรือ KRA ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการให้บริการ

3.6.3 การรวบรวมส่วนประกอบของกุญแจ และการกู้คืนกุญแจ มีกระบวนการทำงาน 2 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่ 1 กระบวนการกู้คืนกุญแจที่อาศัย KRC (หน้าที่ของ KRC และ KRA)

(1) เมื่อ KRC ได้รับคำร้องขอคืนกุญแจ พร้อมกับ KRF จะมีการตรวจสอบสิทธิ์ในการเข้าถึงกุญแจในเบื้องต้น จากนั้นจะร้องขอส่วนประกอบกุญแจไปยัง KRA ที่เกี่ยวข้อง

(2) เมื่อ KRA ได้รับคำร้องขอส่วนประกอบของกุญแจ จะมีกระบวนการพิสูจน์ตัวจริง และจัดส่งส่วนประกอบของกุญแจไปให้กับ KRC

(3) จากนั้น KRC ทำการรวบรวมส่วนประกอบของกุญแจจาก KRA เมื่อรวบรวมได้ครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว จะคำนวณกุญแจลับ ส่งให้กับผู้ร้องขอต่อไป

อย่างไรก็ตามการออกแบบกระบวนการกู้คืนกุญแจของรูปแบบนี้ สามารถมอบหมายให้ผู้ร้องขอการกู้คืน ทำหน้าที่ในการกู้คืนกุญแจลับด้วยตนเอง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวมากยิ่งขึ้น

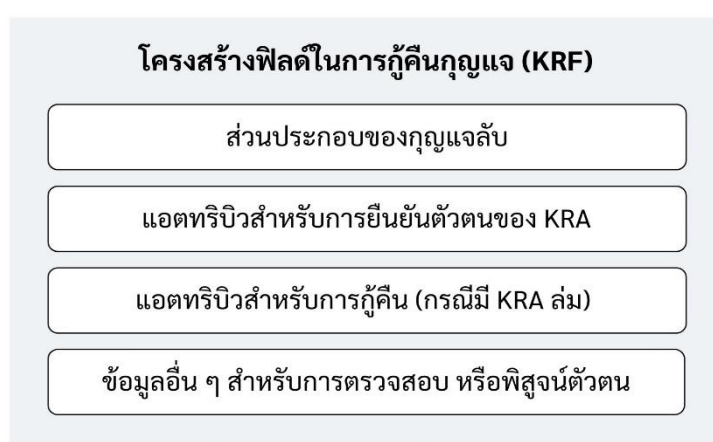
รูปแบบที่ 2 กระบวนการกู้คืนกุญแจที่ไม่อาศัย KRC (หน้าที่ของ KRA และผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจ)

(1) เมื่อ KRA ได้รับคำร้องขอกู้คืนกุญแจ พร้อมกับ KRF จะมีการตรวจสอบสิทธิ์ในการเข้าถึงกุญแจ และส่งส่วนประกอบกุญแจไปยังผู้ร้องขอ

(2) ผู้ร้องขอรวบรวมส่วนประกอบของกุญแจจนครบ และทำการคำนวณกุญแจกลับ เพื่อนำไปใช้ในการถอดรหัสข้อมูล

3.7 โครงสร้างฟิลต์ในการกู้คืนกุญแจ (KRF)

การจัดเก็บกุญแจกลับเพื่อรองรับการกู้คืนกุญแจ มีการออกแบบโครงสร้างโดยคำนึงถึงความมั่นคงปลอดภัย ความยืดหยุ่น ความน่าเชื่อถือ ความเป็นส่วนตัว และความสามารถในการกู้คืนกุญแจ เพื่อลดความเสี่ยงจากการถูกโจมตีทางไซเบอร์ ซึ่งในเทคโนโลยีแบบ M-KRA จะแบ่งกุญแจออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามจำนวน KRA ที่ใช้สำหรับการกู้คืน โดยจัดเก็บไว้ในฟิลต์ KRF โดยโครงสร้าง KRF ที่มีความมั่นคงปลอดภัยสูง ควรประกอบไปด้วยข้อมูลที่จำเป็น ดังแสดงในรูปที่ 3 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 โครงสร้างฟิลต์ในการกู้คืนกุญแจ (KRF)

3.7.1 ส่วนประกอบของกุญแจกลับ ที่มีการกระจายในลักษณะการแชร์ความลับ (Secret Sharing)

3.7.2 แอตทริบิวต์สำหรับการยืนยันตัวตนของ KRA ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืน หรือการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึง KRF โดยใช้ รายการควบคุมการเข้าถึง (Access Control List) หรือการควบคุมสิทธิ์การเข้าถึงตามบทบาทหน้าที่ (Role-Based Access Control)

3.7.3 แอตทริบิวต์สำหรับการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ ในกรณี KRA ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืนล่ม หรือมีกลไกสำรอง (Failover Mechanism) ที่สามารถกำหนดจำนวน KRA ว่าต้องมียังอย่างน้อย n จาก m เอเจนต์ ในการกู้คืนกุญแจ (Multi-Agent Consensus)

3.7.4 ข้อมูลที่จำเป็นอื่น ๆ สำหรับการตรวจสอบหรือการพิสูจน์ตัวจริงของผู้ที่เกี่ยวข้องในการสื่อสาร เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของการสื่อสาร เช่น ข้อมูลใบรับรองกุญแจสาธารณะของเอเจนต์ และของผู้ที่มีสิทธิ์ในการร้องขอการกู้คืนกุญแจ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามประเด็นการพิสูจน์ว่า KRF มีความสมบูรณ์ไม่ถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ โดยสามารถใช้ระบบบันทึกแบบป้องกันการปลอมแปลง (Immutable Logging) [21] ซึ่งเป็นวิธีบันทึกข้อมูลที่ไม่สามารถลบ แก้ไข หรือดัดแปลงได้ เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นข้อมูลเดิมแท้ (Integrity) และสามารถใช้เป็นหลักฐานในการตรวจสอบย้อนหลัง (Audit Trail) ที่เชื่อถือได้ ทั้งนี้ทุกการร้องขอและการกู้คืนกุญแจควรได้รับการบันทึกในระบบเพื่อการตรวจสอบ

4. การวิเคราะห์และสังเคราะห์แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถรับมือกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่หลากหลายรูปแบบ และเพื่อสนับสนุนรองรับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในด้านความปลอดภัย ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้ในงานส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่การรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในองค์กร การปกป้องข้อมูลส่วนบุคคล และการบังคับใช้ในทางกฎหมาย เป็นต้น ดังกรณีตัวอย่างของการนำไปประยุกต์ใช้ดังนี้

กรณีที่ 1 งานการเงินและธนาคาร

ธนาคารพาณิชย์ระดับสากลมักใช้ระบบ Enterprise Key Management (EKM) ร่วมกับเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจ เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลลูกค้า กรณีที่กุญแจลับที่ใช้เข้ารหัสสูญหาย ระบบจะกำหนดให้มีหน่วยงานกู้คืนที่เชื่อถือได้ (Trusted Recovery Agent: TRA) ทำงานภายใต้เงื่อนไขความปลอดภัยที่กำหนดไว้ เช่น การได้รับอนุมัติจากฝ่ายกฎหมาย และฝ่ายควบคุมความเสี่ยงก่อน จึงดำเนินการกู้คืนกุญแจลับและสามารถเข้าถึงข้อมูลได้

กรณีที่ 2 งานสาธารณสุข

โรงพยาบาลขนาดใหญ่ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา และในยุโรป ได้นำแนวคิดการกู้คืนกุญแจลับมาใช้ร่วมกับ Health Information Systems (HIS) เพื่อปกป้องข้อมูลผู้ป่วย ในกรณีระบบฐานข้อมูลหรือรหัสผ่านถูกลืมหรือถูกโจมตี โดยใช้โครงสร้างแบบ M-KRA ที่ให้ฝ่ายงานสารสนเทศ ฝ่ายกฎหมาย และหัวหน้าหน่วยข้อมูล ต้องทำงานร่วมกัน จึงจะสามารถกู้คืนและเข้าถึงข้อมูลได้

อย่างไรก็ตามแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ในอนาคต ต้องมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาจุดอ่อนของเทคโนโลยี คือ ประเด็นความเสี่ยงของภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่มีความรุนแรงและซับซ้อนมากขึ้น การพิสูจน์ตัวตนในกระบวนการกู้คืนกุญแจที่ต้องมีความรัดกุม สอดคล้องกับกฎหมายความปลอดภัย และเคารพสิทธิความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน

ทั้งนี้การนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาพัฒนาส่วนการกู้คืนกุญแจ จะทำให้เกิดความยืดหยุ่น สามารถรับมือกับภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมกับสร้างความเชื่อมั่นให้ผู้ใช้งานในยุคดิจิทัล โดยแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับในอนาคต สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI: Artificial Intelligence) และการเรียนรู้ของเครื่อง (ML: Machine Learning) มาใช้ในกระบวนการกู้คืนกุญแจลับ เพื่อให้การกู้คืนกุญแจมีความปลอดภัย เกิดความยืดหยุ่นตามการร้องขอกู้คืน โดยให้ AI ตรวจจับความผิดปกติและวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการร้องขอ ซึ่งจะอาศัยข้อมูลทางสถิติและรูปแบบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในอดีต (Anomaly Detection & Behavioral Analytics) โดยอาจใช้โมเดล Anomaly Detection หรือ Decision Tree ในการวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเรียลไทม์ [22] ทั้งนี้เพื่อลดความเสี่ยงของภัยคุกคามทางไซเบอร์

4.2 การออกแบบโมเดลการกู้คืนกุญแจแบบผสมผสาน (Hybrid Model) เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในกระบวนการกู้คืนกุญแจ เป็นการทำงานในรูปแบบ M-KRS ที่ใช้หลักการผสมผสาน Zero Trust Security (ZTS) [19] โดยกำหนดให้มีการตรวจสอบตัวตนทุกครั้ง เข้ากับ Multi-Agent Authentication หรือการพิสูจน์ตัวตนแบบใช้หลายเอเจนต์ และ AI-Based Security [23] ที่ใช้ AI ในการตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติ (Anomaly Detection) มุ่งเน้นที่การเรียนรู้รูปแบบพฤติกรรมปกติของระบบหรือผู้ใช้งาน และตรวจจับความเบี่ยงเบนที่อาจบ่งชี้ถึงภัยคุกคามหรือการโจมตี และ Blockchain Logging [24] ที่ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนในการบันทึกข้อมูล (Blockchain Logging) ช่วยให้สามารถสร้างระบบบันทึกที่ไม่สามารถแก้ไขย้อนหลังได้ ช่วยให้สามารถตรวจจับการปลอมแปลงข้อมูล และสร้างความน่าเชื่อถือในระบบรักษาความปลอดภัยของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และลดช่องโหว่จากภัยคุกคามได้

4.3 พัฒนาการกู้คืนกุญแจที่ไม่ละเมิดสิทธิ์ของผู้ใช้ และปกป้องข้อมูลจากการเข้าถึงโดยมิชอบ (Privacy-Preserving Key Recovery) โดยการใช้การเข้ารหัสลับขั้นสูง เช่น Homomorphic Encryption (HE) [25] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถคำนวณหรือประมวลผลข้อมูลที่ถูกรหัส โดยไม่จำเป็นต้องถอดรหัส กล่าวคือ ระบบสามารถตรวจสอบสิทธิ์ของผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจลับว่าเป็นผู้มีสิทธิ์นั้นหรือไม่ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตรวจสอบ เช่น

การตรวจสอบลายเซ็นดิจิทัล การพิสูจน์ตัวตนจากใบรับรองกุญแจ หรือเงื่อนไขการเข้าถึงโดยที่จำเป็นต้องเข้าถึงข้อมูลที่แท้จริง และใช้กระบวนการตรวจสอบหลายระดับ เพื่อให้มั่นใจว่าการกู้คืนกุญแจมีความมั่นคงปลอดภัย และมีความเป็นส่วนตัวสูงสุด

ถือได้ว่าการนำเทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจกลับมาใช้เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลและการสื่อสาร เป็นแนวทางที่มีความจำเป็นและสำคัญ ในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านความมั่นคงปลอดภัยในยุคดิจิทัลอย่างยั่งยืน

5. บทสรุป

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจลับ (Key Recovery Technology) มีความสำคัญในการเสริมสร้างความมั่นคงด้านความปลอดภัยของข้อมูลในยุคดิจิทัล โดยช่วยป้องกันและแก้ไขปัญหา 2 ประเด็นคือ (1) การสูญหายของกุญแจลับหรือกุญแจลับใช้งานไม่ได้ (2) รองรับการเข้าถึงข้อมูลที่ต้องสงสัยโดยชอบด้วยกฎหมาย ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลสำคัญที่ถูกเข้ารหัสไว้ได้อย่างปลอดภัย โดยไม่ละเมิดความลับและความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล เช่น กฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลของสหภาพยุโรป (General Data Protection Regulation: GDPR) [26] และพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 (Personal Data Protection Act B.E. 2562: PDPA) [27] ซึ่งกำหนดให้ผู้ควบคุมข้อมูล ต้องจัดให้มีมาตรการที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงต้องสามารถกู้คืนข้อมูลและกุญแจที่เกี่ยวข้องในกรณีฉุกเฉินอย่างปลอดภัยและตรวจสอบได้ เพื่อให้ตอบโต้ด้านกฎหมายและจริยธรรมได้อย่างสมบูรณ์ ลดความเสี่ยงจากการถูกดำเนินคดี และสร้างความโปร่งใสในการจัดการข้อมูล

เทคโนโลยีการกู้คืนกุญแจ สามารถแบ่งตามลักษณะการกู้คืนได้ 2 รูปแบบ คือ (1) การกู้คืนกุญแจแบบใช้เอเจนต์เดียว และ (2) การกู้คืนกุญแจแบบใช้หลายเอเจนต์ ซึ่งในยุคปัจจุบันนิยมใช้รูปแบบที่ 2 เนื่องจากมีประสิทธิภาพด้านความมั่นคงปลอดภัยสูงกว่า ส่วนกระบวนการกู้คืนกุญแจฉบับนั้น แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นหน้าที่ของผู้ส่ง ในการเตรียมข้อมูลและการสร้างฟิลด์ KRF ขั้นตอนที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องการร้องขอรับบริการกู้คืนกุญแจ โดยผู้รับหรือหน่วยงานที่มีสิทธิ์ในการเข้าถึงกุญแจ จะร้องขอไปยังส่วนที่ทำหน้าที่ให้บริการกู้คืน คือ KRC หรือ KRA ขั้นตอนที่ 3 และ 4 หน่วยงาน KRC หรือ KRA จะทำหน้าที่รวบรวมส่วนประกอบของกุญแจ และกู้คืนกุญแจ ตามฟังก์ชันงานที่ได้รับมอบหมายหรือกำหนดในระบบตามลำดับ

การกู้คืนกุญแจลับที่ออกแบบมาอย่างมั่นคงปลอดภัยและมีความยืดหยุ่น ช่วยให้องค์กรสามารถรับมือกับเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือภัยคุกคามที่เกิดขึ้นได้ เช่น การโจมตีทางไซเบอร์ สามารถฟื้นฟูข้อมูลที่เสียหาย ลดความเสียหายทางธุรกิจ เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบดิจิทัล และทำให้การดำเนินงานมีความต่อเนื่องแม้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงจากภัยคุกคามสูง นอกจากนี้ยังช่วยปกป้องข้อมูลให้มีความมั่นคงปลอดภัย และลดผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานขององค์กรด้วยกระบวนการกู้คืนที่น่าเชื่อถือ ส่งผลให้เทคโนโลยีนี้เป็นกลไกสำคัญในการสร้างความมั่นคงปลอดภัยและความยั่งยืนในโลกดิจิทัล

แนวทางการพัฒนาในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ และการเรียนรู้ของเครื่อง การออกแบบโมเดลการกู้คืนกุญแจแบบผสมผสาน เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในกระบวนการกู้คืนกุญแจ และการใช้เทคนิคการเข้ารหัสลับขั้นสูงในการพัฒนาการกู้คืนกุญแจที่ไม่ละเมิดสิทธิ์ของผู้ใช้ และปกป้องข้อมูลจากการเข้าถึงโดยมิชอบ เพื่อให้กระบวนการกู้คืนกุญแจมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การพัฒนามาตรฐานสากลด้านการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery) จะช่วยให้เทคโนโลยีนี้ สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง และมีความน่าเชื่อถือในระดับองค์กรและระดับโลก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Stallings, *Cryptography and Network Security Principles & Practice*, 8th ed. Pearson, 2023.
- [2] กนกวรรณ กันยะมี และ จำรัส จันทร์บุญชร, "การเพิ่มความมั่นคงในการบริหารจัดการกุญแจลับสำหรับการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่อาศัยศูนย์กลางในการกู้คืนกุญแจ," *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 171-183, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2567.
- [3] National Institute of Standards and Technology, "Requirements for Key Recovery Products." [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/tacdfipsfkm/finalrpt.pdf> (Accessed: June 10, 2024).
- [4] W. Stallings, *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*, 7th ed. Boston, MA, USA: Pearson Education, 2017.
- [5] National Institute of Standards and Technology (NIST), *NIST Cybersecurity Practice Guide: Data Integrity – Detecting and Responding to Ransomware and Other Destructive Events*, NIST Special Publication 1800-26, Gaithersburg, MD, USA, 2020.
- [6] D. E. Denning, "The US Key Escrow Encryption Technology," *Computer Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 453-457, July, 1994.
- [7] M. Blaze, "Protocol Failure in the Escrowed Encryption Standard," in *2nd ACM Conference on Computer and Communications Security*, Fairfax Virginia USA, 1994, pp. 59-67.
- [8] H. S. Dakoff, "The Clipper Chip Proposal: Deciphering the Unfounded Fears That Are Wrongfully Derailing Its Implementation," *John Marshall Law Review*, vol. 29, no. 2, pp. 475-530, 1996.
- [9] A. Shamir, "How to share a secret," *Communications of the ACM*, vol. 22, no. 11, pp. 612-613, November, 1979.
- [10] S. Lim, S. Kang, and J. Sohn, "Modeling of multiple agent based cryptographic key recovery protocol," in *19th Annual Computer Security Applications Conference*, Las Vegas, NV, USA, 2003, pp. 119-128.
- [11] S. Han, S. Liu, and D. Gu, "Key encapsulation mechanism with tight enhanced security in the multi-user setting: Impossibility result and optimal tightness," in *27th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security*, Singapore, 2021, pp. 483-513.
- [12] สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (ETDA), "เทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานกุญแจสาธารณะ (Public Key Infrastructure: PKI)," [ออนไลน์]. Available: <https://www.etda.or.th/th/Useful-Resource/Knowledge-Sharing/articles/Public-Key-Infrastructure.aspx> (เข้าถึงเมื่อ: 13 พ.ย. 2567).
- [13] K. Kanyamee and C. Sathitwiriawong, "High-availability decentralized multi-agent key recovery system," in *2009 Eighth IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*, Shanghai, China, 2009, pp. 290-294.
- [14] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Post-Quantum Cryptography Standardization," [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>. (Accessed: April. 20, 2025).

- [15] D. J. Bernstein, J. Buchmann and E. Dahmen, *Post-Quantum Cryptography*, Berlin, Germany: Springer, 2009.
- [16] Y.-C. Lee and C.-S. Lai, "On the key recovery of the key escrow system," in *13th Annual Computer Security Applications Conference*, California, USA, 1997, pp. 216-220.
- [17] A. Kundu, N. Ghosh, I. Chokshi, and S. K. Ghosh, "Analysis of attack graph-based metrics for quantification of network security," in *2012 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, India, 2012, pp. 530-535.
- [18] K. Kanyamee and C. Sathitwiriawong, "A secure multiple-agent cryptographic key recovery system," in *IEEE International Conference on Information Reuse & Integration (IRI)*, Las Vegas, NV, USA, 2009, pp. 91-96.
- [19] R. N'goran, A. P. B. Brou, K. G. Pandry, J.-L. Tetchueng, Y. Kermarrec, and O. Asseu, "Zero Trust security strategy for collaboration systems," in *2023 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Doha, Qatar, 2023, pp. 1-6.
- [20] A. Ometov, S. Bezzateev, N. Mäkitalo, S. Andreev, T. Mikkonen, and Y. Koucheryavy, "Multi-Factor Authentication: A Survey," *Cryptography*, vol. 2, no. 1, pp. 1-31, January, 2018.
- [21] A. Aßmuth, R. Duncan, S. Liebl, and M. Söllner, "A secure and privacy-friendly logging scheme," in *Twelfth International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization*, Portugal, 2021, pp. 8-12.
- [22] A. A. Wighneswara, A. Sjahrunnisa, Y. Romadhona, and K. I. Maula, "Network Behavior Anomaly Detection using Decision Tree," in *IEEE 12th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, India, 2023, pp.1-6.
- [23] M. J. Goswami, "AI-Based Anomaly Detection for Real-Time Cybersecurity," *International Journal of Research and Review Techniques (IJRRT)*, vol. 3, no. 1, pp. 45-53, Mar. 2024.
- [24] T. H. Austin and F. Di Troia, "A Blockchain-Based Tamper-Resistant Logging Framework," in *Silicon Valley Cybersecurity Conference*, Virtual Event, 2022, pp. 90-104.
- [25] J. Shen, Y. Zhao, S. Huang, and Y. Ren, "Secure and flexible privacy-preserving federated learning based on multi-key fully homomorphic encryption," *Electronics*, vol. 13, no. 22, November, 2024.
- [26] European Parliament and Council of the European Union, *Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data (General Data Protection Regulation)*, Official Journal of the European Union, L 119, May 4, 2016. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>. (Accessed: April, 13, 2025).
- [27] สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, "พระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562," [ออนไลน์]. Available: https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/A/069/T_0052.PDF. (เข้าถึงเมื่อ: 13 เมษายน 2567).

ใช้ตัวอักษรไม่เกิน 135 ตัวอักษร รวมระยะห่างระหว่างตัวอักษรภาษาไทยและอังกฤษ
ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 18 pt. ระยะห่างระหว่างบรรทัด 22 pt.
A Comparative Study of Classifiers for Analyzing Agricultural Land Use

ชื่อผู้แต่ง นามสกุล¹, ชื่อผู้แต่ง นามสกุล^{2*} และ ชื่อผู้แต่ง นามสกุล³

¹ภาควิชาวิศวกรรมนิวตกรรม มหาวิทยาลัย ABC

^{2,3}ภาควิชาวัสดุนิวตกรรม มหาวิทยาลัย XYZ

Author Name Lastname¹, Author Name Lastname^{2*} and Author Name Lastname³

¹Author Office 1 Department University

^{2,3}Author Office 2 Department University

CorrespondenceAuthor@university.ac.th

Received xx September 2024

Revised xx December 2024

Accepted xx December 2024

บทคัดย่อ

โปรดใส่เครื่องหมาย * ตรงตำแหน่งของชื่อผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding Author) สำหรับการเขียนบทคัดย่อควรครอบคลุมเนื้อหาไม่เกิน 2 ย่อหน้า โดยใช้คำ จำนวน 150 - 250 คำ ด้วยอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 15 pt. ระยะห่างระหว่าง Exactly 22 pt. บทคัดย่อควรสรุปถึงเนื้อหาที่จะกล่าวในบทความทั้งหมด โดยประกอบด้วยวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานที่ศึกษา และผลการทดลอง ไม่ควรมีการอ้างอิงถึงข้อมูลอื่นในส่วน of บทคัดย่อ ควรหลีกเลี่ยงการใช้สูตรทางวิทยาศาสตร์ที่ซับซ้อน ควรมีการใส่คำสำคัญในส่วน of บทคัดย่อนี้ด้วย

คำสำคัญ: คำแนะนำ, บทความ, ส่วน of บทคัดย่อ (โปรดระบุคำสำคัญ 3-5 คำ)

Abstract

Abstract in EnglishContrary to popular belief, Lorem Ipsum is not simply random text. It has roots in a piece of classical Latin literature from 45 BC, making it over 2000 years old. Richard McClintock, a Latin professor at Hampden-Sydney College in Virginia, looked up one of the more obscure Latin words, consectetur, from a Lorem Ipsum passage, and going through the cites of the word in classical literature, discovered the undoubtable source. Lorem Ipsum comes from sections 1.10.32 and 1.10.33 of "de Finibus Bonorum et Malorum" (The Extremes of Good and Evil) by Cicero, written in 45 BC.

Keywords: Research, Writing, Random (โปรดระบุคำสำคัญ 3-5 คำ)

1. บทนำ

ให้ส่งบทความในรูปแบบไฟล์ PDF และ MS word กำหนดรูปแบบหน้าเป็น A4 ขอบซ้าย ขวา บน และล่าง เท่ากับ 2.5 ซม. เนื้อหาใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 15 pt. ระยะห่างระหว่างบรรทัด Exactly 18 pt. จัดตัวอักษรกระจายแบบไทย (Thai distribution) จัดหน้าเป็นคอลัมน์เดียว รูปและตารางสามารถแทรกในเนื้อหาตามความเหมาะสม หากต้องการเน้นคำหรือวลีควรใช้ตัวเอียง ห้ามใช้ตัวหนา ยกเว้นกรณีที่เป็นหัวเรื่องต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป นอกจากนี้ควรใช้หน่วย SI ในการรายงานในบทความ

2. ขอบเขตงานวิจัย

หัวข้อของบทความวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้ตามลำดับ 1. บทนำ 2. ขอบเขตงานวิจัย 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4. การดำเนินการวิจัย 5. ผลการวิจัย 6. สรุป 7. ข้อเสนอแนะ 8. กิตติกรรมประกาศ และ 9. เอกสารอ้างอิง โดยหัวข้อใช้ตัวอักษรหนา สามารถมีหลายหัวข้อย่อยโดยแต่ละหัวข้อย่อย ให้อยู่หน้าจากหัวข้อก่อนหน้า 0.75 ซม.

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพิมพ์บทความไม่ต้องใส่เลขหน้า บทความฉบับเต็มควรมีความยาวของเนื้อหาประมาณ 8 - 15 หน้า อาจประกอบด้วย สัญลักษณ์พิเศษ สมการ รูปภาพ ตาราง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การใส่สัญลักษณ์พิเศษในบทความ

สัญลักษณ์พิเศษควรพิมพ์ด้วยตัวอักษร Times New Roman ขนาด 12 pt. ตัวอย่างเช่น β , μ

3.2 การใส่สมการในบทความ

ต้องเว้นระยะห่างระหว่างข้อความกับสมการ 1 Enter เพื่อป้องกันการสับสน และควรจัดให้สมการอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ และระยะห่างระหว่างสมการตามความเหมาะสม เช่น สมการพิทาโกรัส ตามสมการที่ 1 สมการปริมาตรทรงกลม ตามสมการที่ 2 และสมการพื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกระบอก ตามสมการที่ 3 พร้อมกำหนดเลขที่ของสมการในวงเล็บ (x) เรียงตามลำดับและชิดกับขอบขวาของหน้ากระดาษ ดังแสดง

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (1)$$

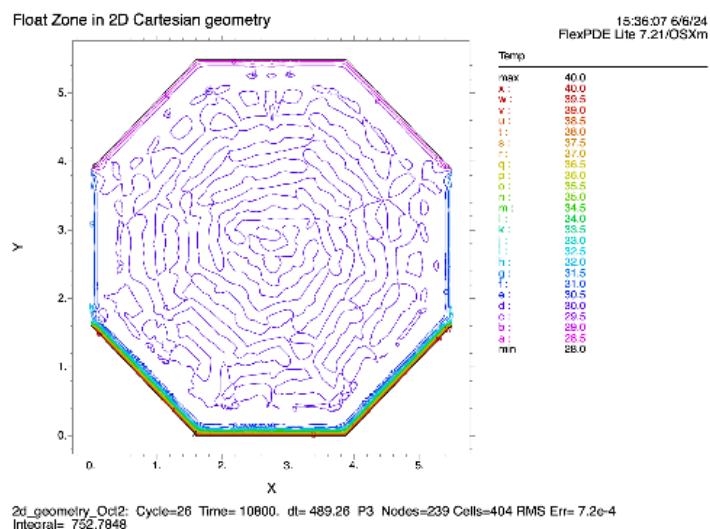
$$V = \pi r^2 h + 2\pi r h \quad (2)$$

$$S = ut + 0.5at^2 \quad (3)$$

3.3 การใส่รูปภาพในบทความ

สามารถแทรกรูปภาพในเนื้อหาได้ โดยควรจะเป็นรูปภาพที่สื่อความหมายเพื่อให้เกิดความเข้าใจในบทความ ถ้ามีข้อความในรูปภาพนั้น ข้อความควรต้องอ่านได้อย่างชัดเจน ต้องเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัดที่แสดงชื่อรูปกับเนื้อหาให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันการสับสน ซึ่งการใส่ชื่อรูปจะไว้ในตำแหน่งใต้รูป ดังรูปที่ 1

ในกรณีที่รูปภาพมีลิขสิทธิ์ให้ใส่เครดิตไว้หลังชื่อรูปนั้น



รูปที่ 1 Contour แสดงการแพร่กระจายความร้อนของพื้นที่หน้าตัดรูปแปดเหลี่ยม (เอกสารอ้างอิง [1])

3.4 การใส่ตารางในบทความ

โดยต้องเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัดที่แสดงชื่อตารางกับเนื้อหาให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันการสับสน และควรจัดตารางให้อยู่กึ่งกลาง ใส่ชื่อตารางไว้ด้านบนตามตัวอย่างตารางที่ 1 และรูปแบบของตารางแบ่งเป็นคอลัมน์ และแสดงกรอบชัดเจนตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุ

วัสดุ	การนำความร้อน λ (W/ mK)	ความร้อนจำเพาะ C_p (kJ/ kgK)	ความหนาแน่น ρ (g/ cm ³)
พลาสติก PS	0.12	1.20	1.06
พลาสติก PVC	0.21	1.10	1.40
พลาสติก PMMA	0.20	1.45	1.18
พลาสติก SAN	0.12	1.40	1.08
พลาสติก ABS	0.25	1.40	1.02

4. การดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกำหนดการวิจัย วิธีการ กิจกรรมต่าง ๆ และรายละเอียดของการวิจัย ผู้วิจัยจะต้องทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลนับตั้งแต่ ประชากร กลุ่มตัวอย่าง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป้าหมายสำคัญ การได้มาซึ่งข้อมูลที่สามารถตอบปัญหาการวิจัยที่ได้มุ่งหมายไว้

5. ผลการวิจัย

ผลที่ได้กระบวนกรจากการดำเนินการวิจัย ผลลัพธ์นี้จะอยู่ในรูปของตาราง รูปภาพ เป็นต้น

6. สรุป

หัวข้อนี้เป็นการนำผลการวิเคราะห์หรือสิ่งที่พบมาสรุปโดยย่อ ซึ่งเป็นการนำคำอธิบายได้ตารางหรือการแปลผลการวิจัย ซึ่งเป็นผลมาจากการสรุปผลการวิจัย โดยการสรุปผลการวิจัยหรือสิ่งที่ค้นพบ จะต้องสรุปเฉพาะประเด็นสำคัญเท่านั้น

7. ข้อเสนอแนะ

เป็นการเขียนข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เสนอขึ้นมาจากผลการวิจัย ข้อค้นพบจากการวิจัย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูล แนวทาง วิธีการ คำแนะนำ ต่อผู้ที่อ่านงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาปรับปรุง ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องต่อการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์หรือต่อยอด

8. กิตติกรรมประกาศ

เป็นการกล่าวขอบคุณผู้ที่ช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีได้แก่ ผู้ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยในการทำวิจัยชิ้นนี้ อาจารย์ เพื่อนร่วมงาน เป็นต้น

9. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิง คือการนำรายชื่อเอกสาร สิ่งพิมพ์ หรือบุคคลที่ผู้เขียนบทความนำมาอ้างอิง มารวบรวมไว้ส่วนท้ายของบทความ ในการเขียนอ้างอิงตามข้อกำหนดของวารสารนี้จะใช้ระบบการเขียนแบบ (IEEE Style) โดยมีรูปแบบการเขียนดังนี้

การอ้างอิงแบบ IEEE มีวิธีการดังนี้

1. ใส่ตัวเลขกำกับไว้ในเครื่องหมาย [] ท้ายข้อความหรือชื่อบุคคลที่อ้างอิง โดยให้ตัวเลขอยู่ในระดับบรรทัดเดียวกันกับเนื้อหา เช่น [1]
2. ให้ใส่ตัวเลขอ้างอิงเรียงลำดับตั้งแต่เลข 1 เป็นต้นไป ต่อเนื่องกัน และในกรณีที่มีการอ้างอิงซ้ำให้ใช้ตัวเลขเดิมที่เคยใช้อ้างมาก่อนแล้ว
3. แหล่งที่ใช้อ้างอิงทั้งหมดในเนื้อหาจะไปปรากฏอยู่ในบรรณานุกรม โดยการเรียงลำดับตามหมายเลข และพิมพ์หมายเลขอยู่ในเครื่องหมาย []
4. กรณีที่อ้างอิงเอกสารหลายรายการในคราวเดียวกัน
 - 4.1 อ้างอิงไม่เกิน 2 รายการให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่น เช่น [1, 2] หรือ [1, 5]
 - 4.2 อ้างอิงเกิน 2 รายการและเป็นรายการที่ต่อเนื่องกันให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่น เช่น [1-3] หรือ [1-5]
 - 4.3 อ้างอิงเกิน 2 รายการและเป็นรายการทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่นในกรณีไม่ต่อเนื่อง และเครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่นในกรณีต่อเนื่อง เช่น [1, 4-5]
5. ชื่อผู้แต่ง
 - 5.1 ไม่ต้องลงคำนำหน้า ตำแหน่งวิชาการ คำเรียกทางวิชาชีพ ยศทางทหารและตำรวจ

- 5.2 ชื่อผู้แต่งชาวไทยเขียนเป็น ชื่อ นามสกุล
- 5.3 ชื่อผู้แต่งชาวต่างชาติเขียนเป็น อักษรย่อของ ชื่อต้น ชื่อรอง, นามสกุล รวมถึงผู้แต่งชาวไทยที่เขียนบทความเป็นภาษาอังกฤษ
- 5.4 ผู้แต่งมากกว่า 6 คนขึ้นไป ให้ลงผู้แต่งคนแรกแล้วตามด้วย และคณะ หรือ et al.
6. ชื่อเรื่อง ชื่อหนังสือ ชื่อวารสาร ชื่อวิทยานิพนธ์ ใช้ตัวเอียง

ตัวอย่างการอ้างอิงหนังสือ

- รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, ครั้งที่พิมพ์. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์, หน้า.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author. *Title of Book*, ed. City of Publisher: Publisher, Year, Pages.

- [1] สุพักตร์ พิบูลย์, *กลยุทธ์การวิจัยเพื่อพัฒนางานวิจัย*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: จตุพรดีไซน์, 2547, 45-52.
- [2] A. Gilbert, *Cities Poverty and Development Urbanization in the Third World*, London: Oxford University Press, 1982, 48-50.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากการประชุมวิชาการ

- รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ใน *ชื่อการประชุมวิชาการ*, ชื่อสถานที่จัดงาน, วัน เดือน ปีที่จัด, หน้า.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] Author, “Title of paper,” in *Title of Conference*, City, Country of Conference, Month Date, Year, Pages number.

- [3] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “ผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดรู Orifice และ Nozzle ต่อคุณสมบัติการวัดของแอร์เกจ,” ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (MENETT 28)*, จังหวัดขอนแก่น, 15-17 ตุลาคม 2557, น. 45-47.
- [4] S. Müller, D. Bermbach, S. Tai, and F. Pallas, “Benchmarking the Performance Impact of Transport Layer Security in Cloud Database Systems,” in *Cloud Engineering (IC2E) 2014 IEEE International Conference*, Boston, Massachusetts, 2014, pp. 27-36.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์หรือสารนิพนธ์

- รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์,” วิทยานิพนธ์ ชื่อย่อปริญญา (สาขา), ชื่อมหาวิทยาลัย, ชื่อเมือง, ชื่อประเทศ, ปีที่พิมพ์.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author, “Title of dissertation,” Ph.D. dissertation, Department, University, City of University, State, year.
- [๕] J. K. Author, “Title of Thesis,” M.S. thesis, Department, University, City of University, State, year.

- [5] กอchem มะแซ, “สภาพปัญหาและแนวทางการพัฒนาครูในโรงเรียนเอกชนสอนศาสนาอิสลาม สังกัดสำนักงานการศึกษาเอกชนจังหวัดปัตตานี,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2555.
- [6] D. W. Nickel, “The Relationship between IT-Business Alignment and Organizational Culture: An Exploratory Study,” Doctoral Dissertation, University of Memphis, Tennessee, United State, 2005.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากเว็บไซต์

รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่อง,” ชื่อเว็บไซต์ (ถ้ามี) [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <http://...> (เข้าถึงเมื่อ: วัน เดือน ปี).

รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author, “Page title.” Website title. [Online]. Available :Web Address (accessed date retrieved).

[7] CNN Wire Staff, “The Session Initiation Protocol - The Internet Protocol.” [Online]. Available: <http://www.cnn.com> (Accessed: July. 10, 2011).

[8] อนรรักษ์ โชติติลล, “ตัวแบบการพัฒนาผู้นำที่เหมาะสมในสถานการณ์วิกฤติ,” [ออนไลน์]. Available: <http://www.tci-thaijo.org> (เข้าถึงเมื่อ: 2 สิงหาคม 2561).

ตัวอย่างการอ้างอิงจากวารสาร

รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ชื่อวารสาร, ปีที่, ฉบับที่, หน้า, เดือน, ปี.

รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author, “Title of Article,” Title of Journal, Volume, Issue, Pages. Month. Year.

[9] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “องค์การแนวนอน,” วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์, ปีที่ 27, ฉบับที่ 15, หน้า 37-42, มกราคม-มิถุนายน, 2554.

[10] J. R. Beveridge and E. M. Riseman, “How easy is matching 2D line models using local search?,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence*, vol. 19, no. 6, pp. 564-579, June 1997.



Published by
NKRAFA Journal of Science and Technology