



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ

NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 ก.ค. - ธ.ค. 65

Contents

บทความวิจัย

- การศึกษาเทคโนโลยีการรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียงเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มการยืนยันตัวบุคคล
ด้วยเทคโนโลยีชีวมิติที่มีความมั่นคงปลอดภัย สำหรับกองทัพอากาศไทย 1-15
พายัพ ศรินาม และ ประสงค์ ปราณีตพลกรัง
- การศึกษาเปรียบเทียบตัวจำแนกสำหรับการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร 16-25
ปภิกร อันซีน, ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง และ ประสาทพร วงษ์คำช้าง
- การจัดกลุ่มหน่วยประมวลผลแบบเอ็กทรา-จีซีเอส เพื่อการสื่อสารแบบเพอร์ซันนัลไลซ์ 26-39
ออล-ทู-ออล บนเครือข่ายการเชื่อมต่อไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น
- นันทิพัฒน์ พิศุทธางกูร และ เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์
- การเตรียมและสมบัติด้านแรงดันของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก 40-56
โดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร
- ณัฐพล เกษางาม และ วรุต ธรรมวิชัย
- การพัฒนาและประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญา 57-72
และอัตลักษณ์ไทยใน 4 ภูมิภาคด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์
- บุญชม สุดจิตต์, ธนา สุขวารี และ ประสงค์ ปราณีตพลกรัง
- การสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า 73-82
ชุดิเดช มั่นคงธรรม และ ชณิชา หมอยาดี
- การพยากรณ์ยอดขาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลัง กรณีศึกษาธุรกิจค้าปลีก 83-98
นิศาชล ภูมิพงศ์ไทย และ สราวุธ ลักษณะโต
- การบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ 99-111
ชณิชา หมอยาดี, ธิติ จิรวรรณกร, ชลิตา ตริยวานิช และ ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์





วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นเรศวร ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลอากาศโท วชิรศักดิ์ พุทธิธี _____ ผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
พลอากาศโท ศ.ดร.พิชาญ พิชัยณรงค์ _____ ข้าราชการนอกราชการ สังกัดกองบัญชาการ กองทัพอากาศ
พลอากาศตรี จักรกฤษณ์ ธรรมวิชัย _____ ผู้อำนวยการสำนักนโยบายและแผน กรมยุทธการทหารอากาศ
พลอากาศตรี ศ.ดร.ประสงค์ ประณีตพลกรัง _____ ผู้อำนวยการ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
พลอากาศตรี ผศ.วัชรินทร์ โกมุลผล _____ ผู้อำนวยการ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ที่ปรึกษาวิชาการ

พลอากาศตรี ณัฐวุฒิ อจลบุญ _____ เสนาธิการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก รศ.ดร.เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ _____ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณค่าแก่ผู้ที่สนใจ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางรายงานความก้าวหน้าผลงานด้านการวิจัย
3. เพื่อแลกเปลี่ยนแนวความคิด ความรู้ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิชาการและวิจัยด้านอากาศยาน การบิน อวกาศ คอมพิวเตอร์ ไซเบอร์ เทคโนโลยีป้องกันประเทศ และวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขต

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นเรศวร จัดทำขึ้นตามวัตถุประสงค์ข้างต้น โดยส่งในรูปแบบบทความทาง Online ซึ่งบทความทุกเรื่องจะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewer) อย่างน้อย 3 คน โดยเป็นการประเมินแบบผู้ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่ง และผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ประเมินบทความ (Double-blind) กองบรรณาธิการ จะเป็นผู้พิจารณาในกระบวนการสุดท้ายในการรับตีพิมพ์ บทความที่รับแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ บทความวิชาการ (Academic Articles) และบทความวิจัย (Research Articles) จะต้องเป็นผลงานใหม่ ไม่มีการคัดลอกผลงานจากผู้อื่น มีกำหนดตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี

โดยฉบับที่ 1 มกราคม–มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม–ธันวาคม ของทุกปี

สถานที่ติดต่อ

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
171/1 ถ.พหลโยธิน คลองถนน สายใหม่ กทม. 10220
โทรศัพท์ 08 1412 1412

E-mail : kiatkulchai@rtaf.mi.th

Website : <https://www.nkraf.ac.th>

<https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkraf-sct>

ดูแลระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์

นาวาอากาศเอก รศ.ธนินทร์รัฐ สิริเวชชะพันธ์
นาวาอากาศโท รศ.ดร.ฐานันท์ บัวภิบาล
นาวาอากาศโท ผศ.โชคชัย แจ่มอำพร
เรืออากาศเอก อภิรักษ์ โกษพิพิธ
เรืออากาศเอกหญิง เพ็ญฤพวรรณ เมืองวงศ์
เรืออากาศโท ผศ.ดร.วิสูตร คล้ายแจ้ง
จ่าอากาศตรี หญิง อิงฟ้า คำงาม

ออกแบบปกและจัดรูปเล่ม พันจ่าอากาศตรี อิศรา ใต้รูป

ISSN(Print) :2651-1134

ISSN(Online) :2651-1002

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ (NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) ซึ่งฉบับนี้เป็นปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 โดยวารสารออนไลน์ใช้ระบบ ThaiJO 2.0 มีหมายเลข ISSN (Online) คือ 2651-1002 และวารสารเป็นเล่ม มี ISSN (Print) คือ 2651-1134 ซึ่งวารสารมีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม) ซึ่งกองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศได้ทุ่มเททำงานเพื่อดำรงความมีคุณค่าของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฯ และยังมุ่งมั่นที่จะปรับระดับคุณภาพของวารสารฯ ให้พร้อมที่จะเข้าสู่การประเมินเพื่อเลื่อนขึ้นสู่วารสารกลุ่มที่ 1 ต่อไป

กองบรรณาธิการฯ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนบทความทุกท่านที่ให้ความไว้วางใจในการส่งบทความ จำนวน 8 บทความ (บทความภายนอก 4 บทความ บทความภายใน 4 บทความ) เพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 กองบรรณาธิการฯ ขอขอบคุณมูลนิธิพลอากาศเอก ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ ฤทธาณิน คณะที่ปรึกษา และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาใช้เวลาในการตรวจสอบคุณภาพของบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่ง สุดท้าย ขอขอบคุณ ทีมงานที่เกี่ยวข้องทุกคนที่ทำให้รูปเล่มของวารสารฯ มีความสมบูรณ์และสวยงาม จนเกิดความสำเร็จทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณตามมาตรฐานคุณภาพของ TCI

นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ
บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ

การศึกษาเทคโนโลยีการรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียงเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มการยืนยันตัวบุคคล ด้วยเทคโนโลยีชีวมิติที่มีความมั่นคงปลอดภัย สำหรับกองทัพอากาศไทย

The Study of Speaker Recognition Technology to Develop a Secure Biometric Authentication Platform for RTAF

^{1*}พายัพ สิรินาม และ ^{2#}ประสงค์ ปราณีตพลกรัง

^{1,2} กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*}Payap Sirinam, ^{2#}Prasong Praneetpolgrang

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

*payap_siri@rtaf.mi.th, #prasong_pra@rtaf.mi.th

Received : November 22, 2022

Revised : December 6, 2022

Accepted : December 7, 2022

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้งานการยืนยันตัวบุคคลด้วยเทคโนโลยีชีวมิติได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น สำหรับการยืนยันตัวบุคคลแบบหลายปัจจัย ถึงกระนั้นกองทัพอากาศยังขาดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีชีวมิติเพื่อการยืนยันตัวบุคคล ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้วิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีชีวมิติด้วยการใช้เสียงของมนุษย์เพื่อใช้ยืนยันตัวบุคคล เนื่องจากชีวมิติดังกล่าวมีความแม่นยำ ปลอดภัย และใช้ต้นทุนในการพัฒนาระบบที่ต่ำกว่าชีวมิติประเภทอื่น ๆ โดยคณะผู้วิจัยได้พัฒนาโมเดลโดยใช้ชุดข้อมูล LibriSpeech และทำการทดสอบโดยใช้เสียงภาษาไทย ภายใต้ข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมและความเสี่ยงจากเสียงปลอมแปลงจากเทคโนโลยี Deep Voice ผลการทดลองพบว่า โมเดลมีระดับความถูกต้องในการยืนยันตัวบุคคลที่ดีที่สุดอยู่ที่ 75% ณ ค่าขีดแบ่งที่ 0.9 และพบว่า ปัจจัยเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบอย่างมีนัยยะสำคัญต่อประสิทธิภาพของโมเดลได้แก่ รูปแบบประโยคในการยืนยันตัวบุคคลที่แตกต่างกัน ประเภทของอุปกรณ์บันทึกเสียงที่แตกต่างกัน ในทางตรงกันข้าม การใส่หน้ากากอนามัยและเสียงรบกวนต่าง ๆ ที่ไม่ดังเกินไป กลับไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยยะสำคัญกับประสิทธิภาพมากไปกว่านั้น ผลการวิจัยยังระบุว่า โมเดลดังกล่าวมีความเปราะบางต่อเสียงปลอมแปลงจากเทคโนโลยี Deep Voice ซึ่งเป็นการเน้นย้ำถึงความสำคัญของการพัฒนาโมเดลที่ทนทานต่อการโจมตีทางไซเบอร์ดังกล่าวก่อนที่จะนำเอาโมเดลไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต

คำสำคัญ: การรู้จำตัวผู้พูด, การเรียนรู้เชิงลึก, ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

Abstract

Applications for multi-factor authentication using biometrics are becoming increasingly popular today. However, the Royal Thai Air Force has not implemented biometric technologies for identity verification. For this reason, the research team conducted a study and created a body of knowledge on the use of biometric

technologies to identify individuals by their voice. The researchers created a model based on the LibriSpeech dataset and tested it using the Thai voice, as such biometric methods are more accurate, secure, and cost-effective than other biometric methods. The results reveal that environmental elements such as different sentence forms for verification and different types of recording devices are found to significantly affect the performance of the model. In contrast, wearing a mask and other quiet noises do not significantly decrease the performance of the model. Finally, the results also show the model's vulnerability to deep voice spoofing, highlighting the need to develop a model that is resistant to such cyberattacks before it is used in the future.

Keywords: Speaker Recognition, Deep Learning, Cyber Security

1. บทนำ

ในปัจจุบัน วิทยาการด้านการประมวลผลส่งผลให้ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยความก้าวหน้าดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อมนุษย์ เสริมสร้างความสะดวกสบาย ความมั่นคงปลอดภัยในชีวิตและความมั่นคงของชาติ (National Security) ในทางกลับกัน เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ อาจถูกนำมาใช้งานอย่างไม่ถูกต้องและอาจส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ เช่น การปลอมแปลงอัตลักษณ์ส่วนบุคคล (Fake Personal Identity) และที่สำคัญคือ การใช้เทคโนโลยีดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของชาติ

การปลอมแปลงอัตลักษณ์ส่วนบุคคล ถือเป็นหนึ่งในภัยคุกคามที่มีศักยภาพ (Potential Threat) โดยเมื่อผู้เสียหาย (Victim) ถูกปลอมแปลงอัตลักษณ์ส่วนบุคคล ก็จะส่งผลเสียโดยตรงต่อชื่อเสียง และหากผู้เสียหาย เป็นบุคคลที่มีอำนาจในการสั่งการ หรือดำเนินการในงานด้านความมั่นคง อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงอย่างมีนัยยะสำคัญ เช่น การปลอมแปลงตัวตนของผู้บังคับบัญชา ที่อาจส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์องค์กร รวมถึงการออกคำสั่งทางยุทธการที่มีได้มาจากผู้ที่มีอำนาจแท้จริง ดังนั้น เทคโนโลยีการยืนยันตัวตนที่มีความแม่นยำเชื่อถือได้จึงมีส่วนสำคัญในการป้องกันปัญหาดังกล่าว โดยในปัจจุบัน เทคโนโลยีการยืนยันตัวตนสามารถดำเนินการได้ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้รหัสผ่านที่มีความแข็งแรง (Strong Password) การยืนยันตัวตนแบบ 2 ชั้น (Two-Factor Authentication) รวมถึงการใช้การยืนยันตัวตนด้วยข้อมูลทางชีวมิติ (Biometric Authentication) ผ่านการยืนยันตัวตนด้วยการรู้จำใบหน้า (Face Recognition) การรู้จำด้วยการสแกนม่านตา (Iris Recognition) การยืนยันตัวตนด้วยการใช้เสียงบุคคล (Speaker Recognition) โดยในปัจจุบันกองทัพอากาศ มีการประยุกต์ใช้งานการยืนยันตัวตน 2 แบบ ผ่านการใช้รหัสผ่านคู่กับรหัสลับที่ถูกส่งไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน และถูกใช้งานเฉพาะการเข้าถึงระบบอีเมลกองทัพอากาศของผู้บังคับบัญชา รวมถึงผู้ที่มีความประสงค์จะใช้งานเท่านั้น [1] ที่สำคัญคือ การใช้งานการยืนยันตัวตนด้วยข้อมูลทางชีวมิติที่มีความแม่นยำและมีความมั่นคงปลอดภัยสูงยังคงมีการประยุกต์ใช้งานในวงที่จำกัด จึงเป็นปัญหาและความท้าทายต่อการรองรับต่อความเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยีและภัยคุกคามทางไซเบอร์ที่เกิดขึ้นในอนาคต

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 คณะผู้วิจัยปฏิบัติงานบนทรัพยากรพื้นฐานที่มีอยู่ของห้องปฏิบัติการทางไซเบอร์ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และที่ได้รับการจัดสรรจากโครงการวิจัยนี้ และผลงานวิจัย มีขีดความสามารถการประมวลผลอย่างจำกัดตามทรัพยากรวิจัยที่มีอยู่

2.2 การวิจัยมุ่งเน้นศึกษาแนวทางการพัฒนาและประยุกต์ใช้โมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ณ ห้วงเวลาการทำวิจัย และสอดคล้องกับทรัพยากรที่มีอยู่จำนวน 1 โมเดล บนพื้นฐานของบริบทของกองทัพอากาศไทย

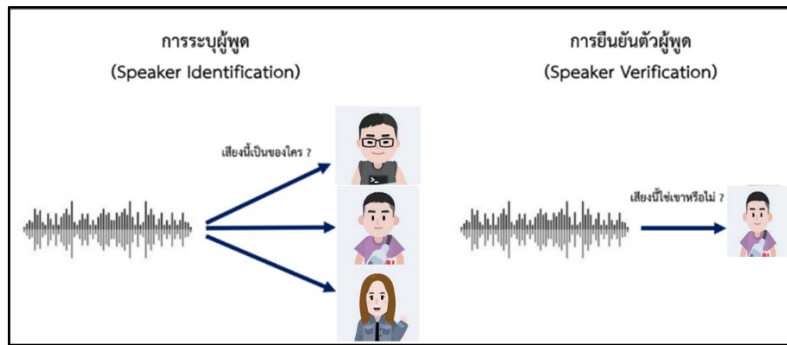
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การพิสูจน์และยืนยันตัวตน

การพิสูจน์และยืนยันตัวตน (Authentication) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการตรวจสอบบุคคลก่อนเข้าใช้งานระบบคอมพิวเตอร์เพื่อพิสูจน์ทราบว่าเป็นบุคคลนั้นจริง ซึ่งถือเป็นระบบที่มีความสำคัญต่อความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ เพราะเป็นกระบวนการที่จะรับรองว่าจะไม่มีการปลอมแปลงอัตลักษณ์ของบุคคล หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สิทธิ์ในการใช้งานต้องถูกจำกัดไว้สำหรับผู้ที่มิสิทธิ์เท่านั้น โดยในปัจจุบัน กระบวนการพิสูจน์และยืนยันตัวตนได้ถูกใช้งานทั่วไป และแพร่หลายในการบริการต่าง ๆ เช่น การใช้บริการผ่านระบบอินเทอร์เน็ต การเข้าใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การเข้าถึงบัญชีผู้ใช้งานในระบบออนไลน์ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับวิธีการพิสูจน์และยืนยันตัวตนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [2] ดังนี้ 1) สิ่งที่คุณรู้ เช่น ชื่อบัญชี รหัสผ่าน รหัส PIN หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน หรือคำถามคำตอบที่เป็นความลับ เป็นต้น 2) สิ่งที่คุณมี เช่น โทรศัพท์มือถือที่ใช้คู่กับ One-Time Password (OTP) หรือแอปพลิเคชันเพื่อยืนยันตัวตน (Authentication Application) รวมถึง Token และบัตรต่าง ๆ เป็นต้น และ 3) สิ่งที่คุณเป็นหรือชีวมิติ (Biometric) เช่น ลายนิ้วมือ ฝ่ามือ ม่านตา ใบหน้า เสียง รวมถึงพฤติกรรมที่ทำเป็นประจำ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ การยืนยันตัวตนจะใช้รูปแบบชื่อบัญชีผู้ใช้ (Username) และรหัสผ่าน (Password) ถึงกระนั้น รหัสผ่านที่สร้างขึ้นในบางครั้ง อาจมีความไม่ปลอดภัย เช่น การตั้งรหัสผ่านที่มีความปลอดภัยต่ำต่อการคาดเดา และหากมีการถูกโจมตี ผู้โจมตีจะสามารถเข้าถึงทรัพยากรของระบบโดยไม่ได้รับอนุญาตได้ทันที ดังนั้น การพิสูจน์และยืนยันตัวตนด้วยหลายปัจจัยจึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัย เช่น การใช้รหัสผ่านควบคู่กับ OTP การใช้รหัสผ่านคู่กับลายนิ้วมือ เป็นต้น ซึ่งอาจมีข้อเสียคือ ต้องมีการเพิ่มขึ้นขั้นตอนของการดำเนินการในการยืนยันตัวตน รวมถึงการจัดหาอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ที่อ่านลายนิ้วมือ ที่อ่านม่านตา ไมโครโฟน ในการรับค่าชีวมิติในการยืนยันตัวตน ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเลือกการยืนยันตัวตนด้วยเสียง เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับค่าชีวมิติ (ไมโครโฟน) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถหาได้ง่ายสำหรับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพาทั่วไป

3.2 การรู้จำตัวตนด้วยเสียง

การรู้จำตัวตนด้วยเสียง (Speaker Recognition) เป็นเทคโนโลยีการพิสูจน์และยืนยันตัวตนด้วยชีวมิติผ่านเสียงพูดของมนุษย์โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การระบุผู้พูด (Speaker Identification) และการยืนยันตัวผู้พูด (Speaker Verification) [3] โดยการระบุผู้พูด เป็นกระบวนการเพื่อระบุว่าเสียงดังกล่าวใกล้เคียงกับเสียงของบุคคลใดมากที่สุด [4] ในขณะที่การยืนยันตัวผู้พูด เป็นกระบวนการเพื่อตรวจสอบว่าเสียงดังกล่าวเป็นเสียงของบุคคลผู้นั้นจริงหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ถึงอย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการระบุผู้พูดและการยืนยันตัวผู้พูดมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ การระบุผู้พูด คือการยืนยันตัวผู้พูดกับคลังข้อมูลเสียงของผู้พูดหลายคน และวัดค่าความคล้าย (Similarity Score) เพื่อหาว่าเสียงดังกล่าวมีความคล้ายกับเสียงของผู้พูดคนใดมากที่สุด



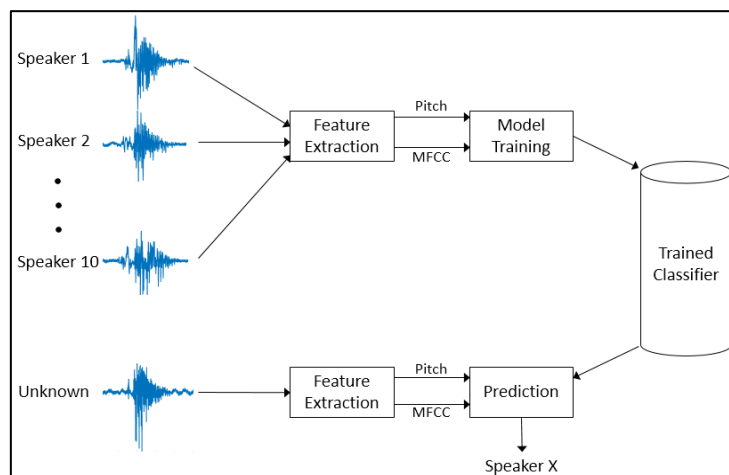
รูปที่ 1 รูปแบบการรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียง

3.3 การรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียงผ่านการเรียนรู้เชิงลึก

การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามามีบทบาทต่อการพัฒนาโมเดลเพื่อทำการระบุหรือยืนยันตัวบุคคลผ่านเสียงพูดของมนุษย์ โดยขั้นตอนการของการฝึกฝนโมเดล (Training Phase) และการนำไปใช้งานผ่านการทดสอบ (Testing Phase) ใช้หลักการพื้นฐานเดียวกันกับการเรียนรู้เชิงลึกในงานด้านอื่น ๆ เช่น การรู้จำวัตถุ การรู้จำภาพบุคคล เป็นต้น [5] ในรูปที่ 2 แสดงถึงขั้นตอนการฝึกฝนและทดสอบโมเดล [4] โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1 การฝึกฝนโมเดล

ในขั้นตอนแรกคือการระบุบุคคลเป้าหมาย (Target Speakers) ที่ต้องการให้โมเดลทำการเรียนรู้ เช่น หากต้องการสร้างโมเดลเพื่อระบุว่าเสียงดังกล่าวเป็นกำลังพลกองทัพอากาศ ในกรณีนี้ สมมติมีกำลังพลอยู่ 10 คน หมายความว่า ทั้ง 10 คนเหล่านี้จะเป็นบุคคลเป้าหมายสำหรับการฝึกฝนโมเดลนี้ หลังจากนั้น ก็ทำการบันทึกเสียง n เสียงของกำลังพลทั้ง 10 คน จากนั้นก็ทำการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) [6] ซึ่งเป็นกระบวนการในการแปลงข้อมูลคลื่นเสียง (Wave Form) ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปฝึกฝนโมเดลได้ ซึ่งในกรณีนี้จะอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ (Matrix) ที่ประกอบด้วยค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของเสียง เช่น ค่า Pitch, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) เป็นต้น [4] จากนั้น ก็ทำการส่งค่าคุณลักษณะดังกล่าวเพื่อทำการฝึกฝนโมเดลโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเชิงลึกต่าง ๆ เช่น Deep Neural Networks (DNN), Convolutional Neural Networks (CNN) เป็นต้น เมื่อทำการฝึกฝนโมเดลเสร็จแล้วก็จะได้โมเดลที่พร้อมสำหรับการจำแนกว่าเสียงดังกล่าวเป็นเสียงของใคร (Trained Classifier)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการฝึกฝนและทดสอบโมเดล [4]

3.3.2 การทดสอบโมเดล

เมื่อมีเสียงของบุคคลที่ต้องการระบุหรือยืนยันตัวบุคคล ขั้นตอนแรก คือการการสกัดคุณลักษณะของเสียง เช่นเดียวกับการฝึกฝนโมเดล จากนั้นก็ทำการส่งค่าคุณลักษณะที่สกัดออกมาได้ไปยังโมเดลที่ถูกฝึกฝนมาในขั้นแรก โดยโมเดลจะทำการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าความคล้าย จากนั้นทำการตัดสินใจว่าเสียงดังกล่าว เป็นเสียงของบุคคลใด หรือเป็นเสียงของบุคคลเป้าหมายหรือไม่

3.4 ผลกระทบด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์จากการใช้งาน Deep Voice

ในห้วงที่ผ่านมา มีการศึกษาผลกระทบจากการใช้งานการโคลนเสียงด้วยเครือข่ายประสาทเทียมว่ามีผลกระทบในเชิงลบอย่างไร โดยในปี พ.ศ.2564 นักวิจัยของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ได้ทำการวิจัยโดยการนำเอาเรียนรู้เชิงลึกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการเลียนเสียงของบุคคลหนึ่งผ่านโมเดล เช่น โมเดลการสังเคราะห์เสียงของมนุษย์จากประโยคข้อความต่าง ๆ ที่เป็นภาษาไทย [7] โดยงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและนำเสนอแนวทางการพัฒนาและประยุกต์ใช้โมเดลการเลียนเสียงเชิงลึกสำหรับงานด้านสงครามไซเบอร์ ผ่านการใช้โมเดล GAN [8] โดยผลการศึกษาพบว่า โมเดล StarGAN-VC และ CycleGAN-VC สามารถนำมาใช้ในการแปลงเสียงของบุคคลทั่วไปให้กลายเป็นบุคคลเป้าหมาย เช่น นักการเมือง ผู้บริหารประเทศ เพื่อสร้างข่าวปลอมในสงครามไซเบอร์ ได้ และมีศักยภาพในการหลอกลวงผู้ใช้งานอินเทอร์เน็ตให้หลงเชื่อว่าเสียงที่ถูกปลอมแปลงเป็นเสียงของบุคคลเป้าหมายจริง โดยในกรณีที่น่ากลัวที่สุดกลุ่มตัวอย่างกว่า 40% ถูกหลอกลวง ด้วยเสียงปลอมแปลง ซึ่งผลการค้นพบดังกล่าวได้เน้นย้ำและสร้างความตระหนักต่อภัยคุกคามรูปแบบใหม่ รวมถึงการแสวงหาแนวทางการตรวจจับและป้องกัน

4. การดำเนินการวิจัย

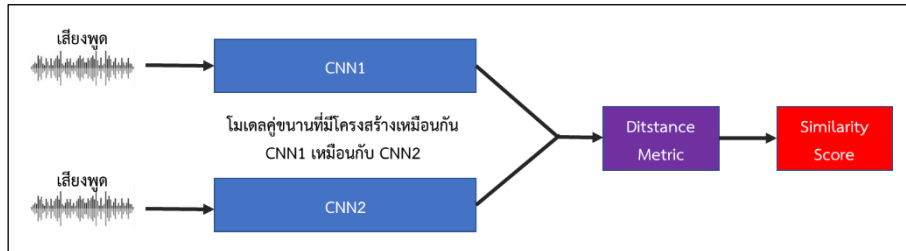
4.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทดสอบหาโมเดลที่เหมาะสม

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียงที่ได้รับการตีพิมพ์ในที่ประชุมทางวิชาการที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับว่าเป็นโมเดลที่มีศักยภาพสูง (State-of-the-Art Models) รวมถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ โดยผลของการศึกษาพบว่า แนวทางการสร้างโมเดล เพื่อรู้จำตัวบุคคลจากเสียงของบุคคล โดยทั่วไปจะใช้โมเดลจำแนกประเภท (Classification Model) และใช้การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ผ่านโมเดลประเภทโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN)

4.1.1 ข้อจำกัดของโมเดลปัจจุบันและคุณลักษณะโมเดลที่มีความเหมาะสม

โมเดลโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันมีข้อจำกัดที่สำคัญของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยเฉพาะในระบบราชการที่มีการโยกย้ายทุก ๆ 6 เดือน โมเดลในลักษณะนี้ไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนจำนวนกำลังพล โดยหากมีการเพิ่มจำนวนกำลังพล โมเดลจะต้องถูกสร้างและฝึกฝนขึ้นมาใหม่ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว รวมถึงการเรียนรู้ของโมเดลยังต้องการต้นแบบเสียงของแต่ละคนจำนวนมาก ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานจริง ผู้ดูแลระบบมีความจำเป็นต้องให้กำลังพลใหม่บันทึกเสียงของตนเองเป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในการฝึกฝนโมเดล ซึ่งอาจสร้างความยุ่งยากในการประยุกต์ใช้ได้ ดังนั้นโมเดลที่มีความเหมาะสม จึงต้องเป็นโมเดลที่มีคุณสมบัติที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงจำนวนกำลังพลได้ เช่น โมเดลที่ไม่จำเป็นต้องฝึกฝนโมเดลใหม่ รวมถึงการฝึกฝนโมเดลไม่จำเป็นต้องใช้เสียงของบุคคลที่มากเกินไป โดยในปัจจุบันมีองค์ความรู้ที่สามารถสร้างโมเดลเพื่อรองรับความต้องการดังกล่าว โดยองค์ความรู้นี้เรียกว่า One-Shot Learning (OSL) ซึ่ง OSL เป็นกระบวนการเรียนรู้เพื่อสร้างโมเดล โดยใช้ข้อมูลจำนวนน้อย หรือใช้เพียงแค่ 1 ตัวอย่างเสียงต่อการเรียนรู้เพื่อสร้างโมเดลในการแยกแยะว่าเป็นคนเดียวกันหรือคนละคนกัน

ในปัจจุบันมีโมเดลที่มีคุณลักษณะดังกล่าวและถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในงานด้าน การยืนยันตัวตนด้วยเทคโนโลยีชีวมิติ (Biometric Authentication) เช่น การรู้จำใบหน้าของบุคคล นั่นคือ โมเดล Siamese Networks ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากเผด็จามหรือ ผาเผด็จามจันทร์ เพราะว่าโมเดลนี้เป็นการสร้างโมเดลคู่ขนาน หรือ 2 โมเดลที่เหมือนกันทุกประการ เพื่อเรียนรู้ในการจำแนกว่าวัตถุทั้งสองว่าเป็นสิ่งเดียวกันหรือแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของโมเดล Siamese Networks

โมเดลดังกล่าวเป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก เช่น โมเดล CNN สองโมเดล ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ โมเดล CNN1 และ CNN2 ซึ่งเป็นโมเดลคู่ขนานจะมีโครงสร้างเหมือนกันทุกประการ โดยในการฝึกฝนโมเดลจะทำการส่งคู่เสียงหรือเสียงพูด 2 เสียง ที่ประกอบด้วยคู่เสียงที่เป็นเสียงพูดคนเดียวกัน และคู่เสียงที่เป็นเสียงพูดคนละคนกัน เพื่อให้โมเดลเรียนรู้การเปรียบเทียบผ่าน Distance Metric ซึ่งใช้วัดค่าความคล้ายของข้อมูล 2 ชุด โดยผลลัพธ์คือคะแนนความคล้าย (Similarity Score) ซึ่งคะแนนยิ่งมากแสดงว่าข้อมูลดังกล่าวยังมีความคล้ายกันมาก ในทางตรงกันข้ามหากข้อมูลที่เป็นข้อมูลชนิดต่างกันหรือเสียง 2 เสียงนี้เป็นคนละคนกันก็จะมีคะแนนความคล้ายน้อย ในขั้นตอนของการฝึกฝนโมเดล โมเดลจะทำการเรียนรู้จากคู่เสียงซ้ำ ๆ กัน ทั้งคู่เสียงจากคนเดียวกันและคู่เสียงจากคนละคนกัน ก็จะสมารถนำโมเดลดังกล่าวไปใช้แยกแยะได้ว่าเสียงที่ต้องการเปรียบเทียบ เช่น เสียงต้นแบบหรือเสียงของบุคคลที่ต้องการยืนยัน กับเสียงของบุคคลปริศนาเป็นคน ๆ เดียวกันหรือไม่

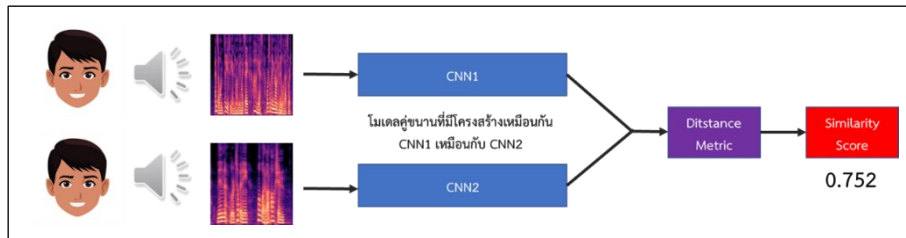
4.1.2 ชุดข้อมูลที่มีความเหมาะสม

คณะผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกข้อมูลไฟล์เสียงซึ่งรวบรวมมาจากชุดข้อมูลเสียงที่ใช้ในงานวิจัยในระดับนานาชาติ ได้แก่ ชุดข้อมูล LibriSpeech [9] ซึ่งประกอบไปด้วยไฟล์เสียงพูดประโยคภาษาอังกฤษหลาย ๆ ประโยคที่มีความยาวรวมกันประมาณ 1,000 ชั่วโมง โดยแต่ละไฟล์เสียงมีความยาวตั้งแต่ 5 ถึง 30 วินาทีต่อไฟล์เสียง ชุดข้อมูลดังกล่าวได้ทำการบันทึกเสียงจากผู้พูด 2,514 คนจากทั้งชายและหญิง โดยในการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยใช้เพียงบางส่วนของเสียงในชุดข้อมูลนี้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านพลังการประมวลผล สำหรับขั้นตอนการฝึกฝน (Training) ใช้ชุดข้อมูล Train-Clean-100 ซึ่งมีความยาว 100 ชั่วโมง จากเสียงผู้พูดจำนวน 251 คน สำหรับการทดสอบ (Testing) ใช้ชุดข้อมูล Test-Clean ซึ่งมีความยาว 5.4 ชั่วโมงจากเสียงผู้พูดจำนวน 40 คน

4.1.3 การทดสอบโมเดลในเบื้องต้น

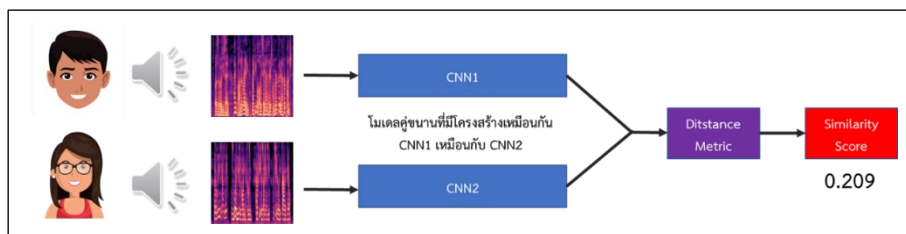
คณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการฝึกฝนโมเดลในขั้นต้นโดยใช้โมเดล Siamese Networks กับชุดข้อมูล LibriSpeech หลังจากได้โมเดลที่ฝึกฝนในขั้นต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไป คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโมเดลด้วยการทดสอบประสิทธิภาพของการแยกแยะผ่านการทดลองคู่ไฟล์เสียง ทั้งคู่เสียงของบุคคลคนเดียวกัน รวมถึงคู่เสียงของบุคคลคนละคน โดยการส่งคู่เสียงผ่านโมเดลคู่ขนาน และวัดค่าความคล้ายของเสียงทั้งสองเสียงดังกล่าว โดยในกรณีแรก เป็นการทดสอบกรณีที่ไฟล์เสียงทั้ง 2 เป็นเสียงจากบุคคลเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการทดลองของคู่เสียงที่เป็นเสียงของบุคคลเดียวกัน

โดยก่อนทำการส่งไฟล์เสียงเข้าสู่โมเดล ไฟล์เสียงจะถูกแปลงเป็น Spectrogram ซึ่งเป็นการแปลงค่าเสียงเป็นแผนภาพที่แสดงความถี่และความเข้มของเสียงก่อน และทำการส่งแผนภาพนี้ต่อไปยังโมเดลเพื่อวัดค่าความคล้าย จะเห็นว่าคะแนนค่าความคล้ายอยู่ที่ 0.752 ซึ่งถือว่าสูง (คะแนน 1.0 แสดงว่าเหมือนกันทุกประการ) ซึ่งผลคะแนนดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า คู่เสียงดังกล่าวเป็นเสียงจากบุคคลเดียวกัน ดังนั้น โมเดลจึงประสบความสำเร็จในการแยกแยะเพื่อยืนยันว่าเป็นบุคคลคนเดียวกัน



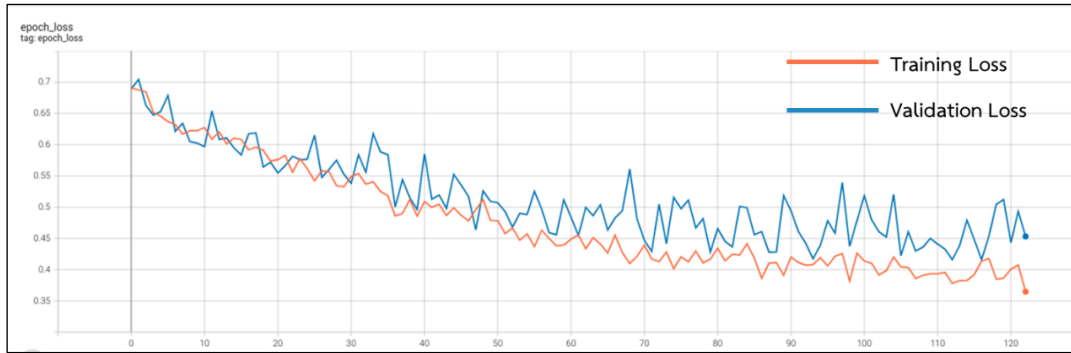
รูปที่ 4 การทดสอบโมเดลขั้นต้น (กรณีเป็นเสียงจากบุคคลเดียวกัน)

โดยในกรณีถัดไป เป็นการทดสอบกรณีที่ไฟล์เสียงทั้ง 2 เป็นเสียงจากบุคคลคนละคนกันดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นทำการส่งแผนภาพ Spectrograms ของแต่ละเสียงต่อไปยังโมเดล เพื่อวัดค่าความคล้าย จะเห็นว่าคะแนนค่าความคล้ายอยู่ที่ 0.209 ซึ่งถือว่าต่ำ ซึ่งผลคะแนนดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า คู่เสียงนี้เป็นเสียงจากบุคคลคนละกัน ดังนั้น โมเดลจึงประสบความสำเร็จในการแยกแยะเพื่อยืนยันว่าเป็นบุคคลคนละคนกัน



รูปที่ 5 การทดสอบโมเดลขั้นต้น (กรณีเป็นเสียงจากบุคคลคนละคนกัน)

จากผลในขั้นต้นที่บ่งชี้ว่า โมเดลมีศักยภาพในการแยกแยะเสียงของบุคคล ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการฝึกฝนโมเดลเดิม ให้มีจำนวนรอบการฝึกฝนที่มากขึ้น โดยในขั้นต้นทำการฝึกฝนไปเพียง 50 รอบของการฝึกฝน แต่ในครั้งนี้ได้ดำเนินการฝึกฝนโมเดลจำนวน 125 รอบของการฝึกฝนและใช้ไฟล์คู่เสียงจำนวน 150,000 คู่เสียง โดยสาเหตุที่หยุดการฝึกฝนไว้ที่ 125 รอบ เนื่องจากกลไก Early Stopping หรือกลไกที่ตรวจสอบว่า โมเดลยังสามารถพัฒนาประสิทธิภาพได้อีกหรือไม่ โดยกลไกได้บ่งชี้ว่าโมเดลถึงจุดที่ประสิทธิภาพโมเดลทำได้ดีที่สุดแล้ว ดังจะเห็นได้จาก ณ หลังจากรอบการฝึกฝนที่ 90 อัตราการลดลงของค่า Loss Value เริ่มคงที่ จนกระทั่งที่รอบที่ 125 กลไกที่ค่าคงที่ไม่มีมีการลดลงแล้วดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้น โมเดลจึงหยุดการฝึกฝน โดยใช้เวลาในการฝึกฝนโมเดลทั้งสิ้นประมาณ 18 ชั่วโมง และใช้โมเดลดังกล่าวเป็นโมเดลหลักในการทำการทดลองทดลองงานวิจัยนี้



รูปที่ 6 กราฟ Loss Value ระหว่างการฝึกฝนโมเดลในขั้นสุดท้าย

4.2 การเก็บข้อมูลเสียงเพื่อทำการทดสอบ

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโมเดลเมื่อนำไปใช้งานจริง คณะผู้วิจัยได้ทำเก็บรวบรวมไฟล์เสียงภาษาไทยจากบุคคล 10 คน โดยใช้เสียงจากกลุ่มตัวอย่างจากนักเรียนนายเรืออากาศ ตามสถานการณ์และรูปแบบการทดสอบในแต่ละประเภท คนละ 50 เสียง รวมทั้งสิ้น 500 เสียง

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลกับภาษาไทย

การเก็บรวบรวมไฟล์เสียงกว่า 500 ไฟล์เสียง ก็เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลบนพื้นฐานสถานการณ์ที่แตกต่างกันไป โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดสถานการณ์ไว้ทั้งหมดจำนวน 6 การทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การทดสอบในภาพรวม (ไม่มีสิ่งรบกวน)

ในการทดสอบแรกเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลในภาพรวม โดยค่าที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพโมเดลคือ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งเป็นการวัดความสามารถของโมเดลในการจำแนกเสียงว่าสามารถจำแนกคู่เสียงที่เป็นต้นแบบ และเสียงของบุคคลที่เข้าทำการยืนยันตัวบุคคลได้ถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยในการวัดประสิทธิภาพดังกล่าว จะใช้การวัดค่าร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของจำนวนเสียงที่แยกแยะได้ถูกต้อง จากจำนวนคู่เสียงที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

โดยในการทดสอบ คณะผู้วิจัยได้ทำการสุ่มคู่เสียงทั้งคู่เสียงที่เป็นคนคนเดียวกัน และคู่เสียงของคนละคนกัน เพื่อวัดว่าโมเดลสามารถทำนายได้ถูกต้องจำนวนกี่ครั้ง โดยเสียงที่ใช้ในการบันทึกนั้นไม่มีสัญญาณรบกวน และคู่เสียงใช้ประโยคเดียวกันในกรณีที่เป็นคนคนเดียวกัน ยกตัวอย่าง เช่น หาก นักเรียนนายเรืออากาศ นกสรพี อุวิเชียร ทำการบันทึกเสียง เพื่อลงทะเบียนในระบบยืนยันตัวบุคคลว่า “กระผม นักเรียนนายเรืออากาศ นกสรพี อุวิเชียร ครับ” เพื่อเป็นเสียงต้นแบบในการยืนยันตนเอง เมื่อ นักเรียนนายเรืออากาศ นกสรพี ๑ ต้องการยืนยันตัวเองก็ต้องพูดว่า “กระผม นักเรียนนายเรืออากาศ นกสรพี อุวิเชียร ครับ” เหมือนกัน ดังนั้นในกรณีนี้ ผู้ใช้งานต้องจำประโยคที่เป็นเหมือนรหัสผ่านให้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างโมเดลสำหรับการทดสอบในภาพรวม (ไม่มีสิ่งรบกวน)

4.3.2 การทดสอบเมื่อคู่เสียงมีประโยชน์ไม่เหมือนกัน

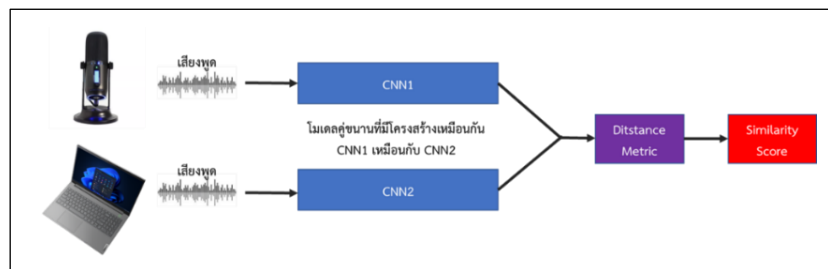
การทดสอบมีรูปแบบการทดลองที่คล้ายกับการทดลองแรก แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญก็คือ ทำการทดสอบโดยมีการเพิ่มเงื่อนไข ข้อจำกัดและความยากให้กับโมเดล โดยในการทดสอบนี้ กำหนดให้คู่เสียงจะใช้ประโยชน์แบบและประโยชน์ที่ใช้ในการยืนยันตัวตนไม่เหมือนกัน ดังนั้นในกรณีนี้ ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องจำประโยชน์ที่เป็นเหมือนรหัสผ่านซึ่งจะมีความง่ายมากขึ้นสำหรับผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 8 โครงสร้างโมเดลสำหรับการทดสอบเมื่อคู่เสียงมีประโยชน์ไม่เหมือนกัน

4.3.3 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (ไมโครโฟน)

ในการทดสอบนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานจริง ในแง่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกเสียง โดยในการทดสอบในข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 เสียงทั้งหมด ทั้งเสียงที่ใช้ในการบันทึกเสียงไฟล์ต้นแบบและบันทึกเสียงสำหรับการยืนยันตัวตนจะถูกบันทึกจากไมโครโฟนรุ่นเดียวกัน จึงเกิดคำถามทางการวิจัยขึ้นว่า ในการประยุกต์ใช้งานระบบการยืนยันตัวตนด้วยเสียงในสถานการณ์จริง หากผู้ใช้งานบันทึกเสียงโดยใช้ไมโครโฟนคนละชนิดกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของโมเดลอย่างไร โดยในการทดลองนี้ ไฟล์คู่เสียงจะถูกบันทึกจากไมโครโฟนคนละชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (ไมโครโฟน)

4.3.4 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (เสียงจากสิ่งแวดล้อม)

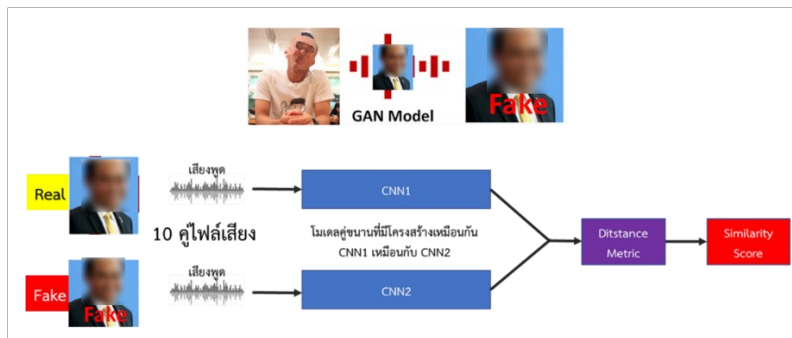
ในการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเสียงรบกวนที่มาจากสภาพแวดล้อม เช่น เสียงจากการก่อสร้างที่อาจเข้ามารบกวนในระหว่างที่มีการยืนยันตัวตนด้วยเสียง โดยในการทดลองนี้ ไฟล์คู่เสียงนั้นเสียงหนึ่งซึ่งเป็นเสียงที่ผู้ใช้งานได้ลงทะเบียนไว้ สำหรับใช้เป็นไฟล์เสียงต้นแบบ จะถูกบันทึกในสภาพแวดล้อมที่ถูกรบกวน คือ ไม่มีเสียงรบกวน และอีกเสียงหนึ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบ จะเป็นการบันทึกเสียงพร้อมกับเปิดไฟล์เสียงที่ได้รับการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยในกรณีนี้ เป็นเสียงจากการก่อสร้างที่คณะผู้วิจัยได้จำลองสถานการณ์โดยเปิดไฟล์เสียงก่อสร้างจากแอปพลิเคชัน YouTube [10] คลอไปด้วยระหว่างบันทึกเสียงซึ่งถือเป็นการจำลองสถานการณ์ว่า ในขณะที่ทำการยืนยันตัวมีเสียงรบกวนจากการก่อสร้าง

4.3.5 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (การใส่หน้ากากอนามัย)

ในการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเสียงรบกวนที่มาจากสภาพแวดล้อม เช่นเดียวกัน โดยจำลองสถานการณ์ในการยืนยันตัวตนบุคคลในห้วงการแพร่ระบาดของโรค COVID - 19 ที่ผู้ยืนยันตัวตนต้องใส่หน้ากากอนามัย โดยในการทดลองนี้ กำหนดให้ไฟล์เสียง ประกอบไปด้วยเสียงที่ผู้ใช้งานได้ลงทะเบียนไว้ก่อนแล้ว ซึ่งยังไม่มี การแพร่ระบาดของโรค COVID - 19 เพื่อเก็บเอาไว้เป็นไฟล์เสียงต้นแบบ โดยถูกบันทึกในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม คือ ไม่มีการใส่หน้ากากอนามัย และอีกเสียงหนึ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะเป็นเสียงที่ผู้ใช้งานต้องบันทึกเพื่อยืนยันตัวตน โดยเสียงนี้จะเป็นการบันทึกเสียงจากผู้ที่ใช้หน้ากากอนามัย

4.3.6 การทดสอบต่อเสียงปลอมแปลง

ในการทดสอบนี้ เป็นการทดสอบ เพื่อจำลองสถานการณ์ว่า หากมีคนใช้เสียงปลอมแปลง เพื่อพยายาม หลอกโมเดล โดยใช้การปลอมแปลงเสียงพูดของบุคคลด้วยเทคโนโลยี Deep Voice ผลการทดลองบ่งชี้ว่า มนุษย์เมื่อฟังเสียงปลอมแปลงแล้ว มีผู้ถูกหลอก 3 ใน 10 คน เข้าใจผิดว่าเสียงปลอมแปลงดังกล่าว นั้น คือเสียงจริง จึงเกิดคำถามงานวิจัยว่า เสียงของมนุษย์ที่ถูกปลอมแปลงด้วยเทคโนโลยี Deep Voice จะมีศักยภาพในการหลอกโมเดลคอมพิวเตอร์สำหรับการยืนยันตัวตนได้มากน้อยเพียงใด โดยในการทดลองนี้ คณะผู้วิจัยได้ใช้ไฟล์เสียงที่ถูกปลอมแปลงและไฟล์จริงของบุคคลจริง จากชุดข้อมูลของงานวิจัย Deep Voice ในปีที่ผ่านมา โดยไฟล์เสียงนั้นประกอบไปด้วย เสียงหนึ่งซึ่งเป็นเสียงจริงที่ผู้ใช้งาน (ในกรณีนี้คือ บุคคลสำคัญ) ได้ลงทะเบียนไว้ล่วงหน้า และอีกเสียงหนึ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งจะเป็นเสียงที่ถูกปลอมแปลงขึ้น เป็นเสียงของบุคคลสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การทดสอบต่อเสียงปลอมแปลง

4.4 การนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบสำหรับกองทัพอากาศไทย

หลังจากดำเนินการทดลองเสร็จสิ้นทั้ง 6 การทดลองข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสรุปผลการศึกษา เพื่อจัดทำ General Implementation Framework ซึ่งเป็นการระบุขั้นตอน ข้อเสนอแนะ ข้อจำกัด รวมถึงข้อพิจารณาในการพัฒนาแพลตฟอร์มการยืนยันตัวตนบุคคลด้วยเทคโนโลยีชีวมิติที่มีความมั่นคงปลอดภัยสำหรับกองทัพอากาศไทยต่อไป

5. ผลการวิจัย

5.1 การทดสอบในภาพรวม (กรณีไม่มีสิ่งรบกวน)

ผลการทดสอบจากคู่เสียงที่ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวนกว่า 1,000 ตัวอย่างคู่เสียง ในค่าขีดแบ่ง (Threshold) ที่แตกต่างกัน โดยค่าดังกล่าวเป็นตัวเลขที่กำหนดว่า หากค่า Similarity Score ที่ได้จากการคำนวณความคล้ายของคู่เสียงตัวอย่าง มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าขีดแบ่ง ตัวโมเดลจะทำนายว่า คู่เสียงดังกล่าวเป็นคนเดียวกัน แต่หากต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง

โมเดลจะทำนายว่าคู่เสียงดังกล่าวเป็นคนละคนกัน เช่น สมมติว่า ใช้ค่าขีดแบ่งที่ 0.9 นั้น หมายความว่า โมเดลดังกล่าวจะทำนายคู่เสียงดังกล่าวจะเป็นบุคคลคนเดียวกันก็ต่อเมื่อค่าความคล้ายมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.9 เท่านั้น จากนั้นจะใช้ผลการทำนายตัวอย่างทั้ง 1,000 คู่เสียงมาเทียบกับข้อเท็จจริง เพื่อคำนวณหาค่าความถูกต้อง โดยจากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของโมเดลในภาพรวม มีค่าความถูกต้องหรือ Accuracy อยู่ที่ 75.88 % ณ ค่าขีดแบ่งที่ 0.9 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความถูกต้องของโมเดลในการทดสอบในภาพรวม (ไม่มีสิ่งรบกวน)

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	56.11	64.22	75.88	62.00

จากผลการทดสอบในแง่ของประสิทธิภาพพบว่า โมเดลมีค่าความแม่นยำอยู่ในระดับค่อนข้างดี โดยมีค่า Accuracy อยู่ที่ประมาณ 75% โดยค่า Threshold ที่มีความเหมาะสมในกรณีนี้คือ 0.9 และสิ่งหนึ่งที่ที่น่าสนใจคือ การที่โมเดลฝึกฝนโดยใช้ภาษาอังกฤษ แต่ทดสอบกับเสียงที่เป็นภาษาไทย ซึ่งจากค่าความถูกต้องดังกล่าวพบว่า ภาษาไทยมีผลต่อประสิทธิภาพการจำแนก ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้ในอนาคต ควรมีการใช้ไฟล์เสียงภาษาไทยในการฝึกฝนโมเดล นอกจากนี้ ระดับค่า Accuracy ที่โมเดลนี้ทำได้ที่ประมาณ 75% ยังอยู่ในระดับที่ไม่สามารถใช้งานเพื่อการยืนยันตัวบุคคลด้วยเสียงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งควรต้องมีการพัฒนาต่อไป

5.2 การทดสอบเมื่อคู่เสียงมีประโยชน์ไม่เหมือนกัน

ผลการทดสอบพบค่าความถูกต้องของโมเดลลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับการทดสอบในข้อ 5.1 โดยเฉพาะกับโมเดลที่ใช้ค่า Threshold ที่ 0.9 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของการหาค่าความถูกต้องจะพบว่าค่าความถูกต้องลดลงจาก 75.88 % เหลือเพียง 59.67 % นอกจากนี้ ค่าความถูกต้องของค่าขีดแบ่งอื่น ๆ ก็ลดลงเช่นเดียวกัน ดังผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความถูกต้องของโมเดลในการทดสอบเมื่อคู่เสียงมีประโยชน์ไม่เหมือนกัน

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	56.00	61.44	59.67	51.56

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้รูปประโยคที่แตกต่างกันในการยืนยันตัวบุคคลมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพโมเดล ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเสนอแนะว่า หากต้องประยุกต์ใช้งานจริงในระบบการยืนยันตัวบุคคลด้วยเสียง ควรใช้ไฟล์คู่เสียงที่เป็นรูปประโยคเดียวกัน ทั้งนี้ ผู้ใช้จำเป็นต้องจำว่าตนประโยชน์ยืนยันตัวบุคคลของตนเองเป็นอะไร ซึ่งถือเป็น Trade Off หรือการแลกเปลี่ยนที่ผู้พัฒนาระบบต้องเลือกระหว่างประสิทธิภาพของโมเดล หรือความง่ายต่อการใช้งาน

5.3 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (ไมโครโฟน)

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความถูกต้องของโมเดลนั้น ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยเฉพาะกับโมเดลที่ใช้ค่า Threshold ที่ 0.9 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของการหาค่าความถูกต้องในการทดสอบแรกในข้อ 5.1 จะพบว่า ค่าความถูกต้องที่ลดลงจาก 75.88 % เหลือเพียง 69.67 % นอกจากนี้ ค่าความถูกต้องของค่าขีดแบ่งอื่น ๆ ก็ลดลงเช่นเดียวกัน ในอัตรา 1-5 % อย่างไรก็ตาม อัตราการลดลงของประสิทธิภาพโมเดลยังน้อยกว่าการทดลองในข้อ 5.2 ซึ่งใช้รูปประโยคข้อความที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (ไมโครโฟน)

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	50.77	60.62	69.23	61.54

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ประเภทของไมโครโฟนในการบันทึกเสียงส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้งานจริงของระบบการยืนยันตัวตนด้วยเสียง ควรใช้ไฟล์เสียงที่ถูกบันทึกจากไมโครโฟนชนิดเดียวกัน

5.4 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (เสียงจากสิ่งแวดล้อม)

ผลการทดสอบพบค่าความถูกต้องของโมเดลลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดยเฉพาะกับโมเดลที่ใช้ค่า Threshold ที่ 0.7 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของการหาค่าความถูกต้องในการทดสอบแรก จะพบว่า ค่าความถูกต้องที่ลดลงจาก 56.11 % เหลือเพียง 49.85 % อยู่ในระดับที่โมเดลใช้งานไม่ได้ แต่หากพิจารณา ค่า Threshold 0.9 ซึ่งเป็นค่า Threshold ที่มีความเหมาะสมจากการทดสอบแรกพบว่า ลดลงเพียงเล็กน้อยในระดับประมาณ 2% เท่านั้น ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (เสียงจากสิ่งแวดล้อม)

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	49.85	61.54	72.62	58.15

จากผลการทดสอบในแง่ของประสิทธิภาพจะเห็นว่า ค่าความถูกต้องส่วนใหญ่ลดลงไม่มาก เมื่อเทียบกับการทดสอบแรก ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า เสียงรบกวนจากสภาพแวดล้อม เช่น เสียงจากการก่อสร้างที่ไม่ดังจนเกินไป ไม่ได้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโมเดล หากเลือกค่า Threshold ที่มีความเหมาะสม ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบการยืนยันตัวตนด้วยเสียง จึงอาจไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์บันทึกเสียงในพื้นที่ปิดเงียบสงบ แต่อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องศึกษาเสียงรบกวนประเภทอื่น ๆ ประกอบกันในอนาคตต่อไป

5.5 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (การใส่หน้ากากอนามัย)

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความถูกต้องของโมเดลลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเฉพาะกับ โมเดลที่ใช้ค่า Threshold ที่ 0.7 และ 0.8 แต่ในค่า Threshold ที่ 0.9 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 และค่า Threshold ที่ 0.95 ค่าความถูกต้องไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การทดสอบเมื่อมีสิ่งรบกวน (การใส่หน้ากากอนามัย)

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	42.46	56.61	75.69	61.85

จากผลการทดสอบในแง่ของประสิทธิภาพจะเห็นว่า ค่าความถูกต้องที่เป็นค่ามาตรฐานที่ค่า Threshold ที่ 0.9 ลดลงไม่มาก เมื่อเทียบกับการทดสอบแรก ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการใส่หน้ากากอนามัย (Mask) ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโมเดล

5.6 การทดสอบต่อเสียงปลอมแปลง (Deep Voice)

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความถูกต้องของโมเดลนั้น ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังจะเห็นได้จากค่า Threshold ที่ 0.7 และ 0.8 ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 0 นั้นหมายความว่า โมเดลถูกหลอกลงอย่างสมบูรณ์ และสำหรับค่า Threshold ระดับ 0.9 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 30 % ซึ่งแปลความได้ว่า โมเดลจำแนกประเภทได้ถูกต้อง 3 ใน 10 เสียง และโมเดลถูกหลอกลง 7 ใน 10 เสียง กล่าวคือ โมเดลเข้าใจว่า เสียงที่ปลอมแปลงของบุคคลสำคัญ คือ เสียงที่แท้จริงของบุคคลสำคัญนั้น แต่เป็นที่น่าสนใจกว่า ณ ค่า Threshold ที่ 0.95 ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 80 % ซึ่งหมายความว่าโมเดลทำนายถูก 8 ใน 10 เสียง ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูง แต่หากเลือกระดับค่า Threshold ดังกล่าวในการประยุกต์ใช้งานจริง เพื่อป้องกันเสียงปลอมแปลง ต้องแลกมาด้วยค่าความถูกต้องที่ลดลง เมื่อโมเดลต้องทำนายกับเสียงปกติ แสดงผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การทดสอบต่อเสียงปลอมแปลง (Deep Voice)

ค่าขีดแบ่ง (Threshold)	0.7	0.8	0.9	0.95
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	42.46	56.61	75.69	61.85

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า โมเดลการยืนยันบุคคลด้วยเสียงยังมีความเปราะบางอย่างมากกับเสียงแปลงด้วยเทคโนโลยี Deep Voice ดังนั้น การศึกษาแนวทางในการป้องกันการหลอกลงโมเดล เป็นสิ่งที่มีความจำเป็น ก่อนที่จะนำโมเดลดังกล่าวไปใช้งานจริง โดยเฉพาะการใช้งานในหน่วยงานด้านความมั่นคง

6. สรุป

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย เพื่อจัดทำแนวทางการประยุกต์ใช้งานทั่วไป (General Implementation Framework) ของเทคโนโลยีการรู้จำตัวบุคคลด้วยเสียงเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคลด้วยเทคโนโลยีชีวมิติที่มีความมั่นคงปลอดภัยสำหรับกองทัพอากาศไทย และมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้งานดังนี้

6.1 รูปแบบโมเดลที่มีความเหมาะสม

จากผลการวิจัย สรุปได้ว่า โมเดลที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเพื่อยืนยันตัวบุคคลที่มีประสิทธิภาพสูง และรองรับต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังพล ซึ่งต้องมีการเพิ่มหรือลดอยู่บ่อยครั้ง โดยไม่จำเป็นต้องทำการฝึกฝนโมเดลใหม่ คือ โมเดลประเภทการเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้รูปแบบการเรียนรู้โมเดลแบบ One-Shot-Learning (OSL) ประเภท Siamese Model

6.2 ชุดข้อมูลเพื่อฝึกฝนโมเดล

ในการฝึกฝนโมเดลให้มีประสิทธิภาพมีความจำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลที่มีมาตรฐานในการฝึกฝนโมเดลสำหรับการเริ่มต้น ชุดข้อมูลที่มีความเหมาะสมได้แก่ชุดข้อมูล LibriSpeech อย่างไรก็ตาม จากผลการวิจัยพบว่า เสียงภาษาไทยส่งผลต่อประสิทธิภาพของการยืนยันตัวบุคคลของโมเดล โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเดลที่ทำการฝึกฝน และทดสอบโดยใช้ภาษาคนละภาษากัน ดังนั้น การประยุกต์ใช้งานในอนาคตการฝึกฝน โมเดลให้มีประสิทธิภาพ ควรมีชุดข้อมูลภาษาไทยเพื่อการฝึกฝน โดยชุดข้อมูลดังกล่าวต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอในการฝึกฝนโมเดล

6.3 รูปแบบไฟล์เสียงเพื่อยืนยันตัวบุคคล

การใช้รูปแบบของไฟล์เสียงเพื่อยืนยันตัวบุคคลส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโมเดลอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยพบว่า การใช้รูปแบบที่แตกต่างกันระหว่างประโยคที่ใช้ในการลงทะเบียน และประโยคที่ใช้ในการยืนยันตัวบุคคล ส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพของโมเดลในแง่ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้ ในสถานการณ์จริง หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดล จึงควรใช้ประโยคที่ใช้ในการยืนยันตัวบุคคลที่เป็นประโยคเดียวกัน

โดยผู้ใช้งานมีความจำเป็นต้องจดจำประโยคที่ตนเองลงทะเบียน เพื่อใช้ในการยืนยันตัวเองให้ถูกต้อง จึงอาจสร้างความภาระเพิ่มเติมให้แก่ผู้ใช้งาน แต่ก็เป็นที่ต้องแลกเปลี่ยน (Trade Off) ระหว่างประสิทธิภาพและความง่ายของการใช้งาน

6.4 ปัจจัยสภาพแวดล้อม

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของโมเดลได้รับผลกระทบในระดับที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ โดยพบว่า เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และลดปัจจัยที่อาจกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของโมเดล ควรใช้อุปกรณ์บันทึกเสียงประเภทเดียวกันสำหรับการบันทึกเสียงที่ใช้ในการลงทะเบียนและการยืนยันตัวตนบุคคล รวมถึงการบันทึกเสียงอาจมีเสียงรบกวนได้บ้าง แต่ต้องไม่อยู่ในระดับที่ดังจนเกินไป และผู้ใช้งานสามารถสวมใส่หน้ากากอนามัยในการยืนยันตัวตนได้

6.5 ปัจจัยภัยคุกคามด้านไซเบอร์

ผลการวิจัยพบว่า โมเดลมีความเปราะบางต่อเสียงที่ปลอมแปลงจากเทคโนโลยี Deep Voice โดยประสิทธิภาพของโมเดลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ค่าความถูกต้องลดลงเหลือเพียง 30 % ดังนั้น แนวทางการแก้ไขจึงเป็นการตั้งค่าขีดแบ่งให้มีความเข้มงวดมากขึ้น เช่น ค่า Threshold ที่ 0.95 แต่ก็ต้องแลกมาด้วยอัตราค่า False Negative ที่สูงมาก จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาในการพัฒนาโมเดลที่มีความทนทานต่อเสียงปลอมแปลงดังกล่าว

7. ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าโมเดลจะมีค่าความแม่นยำอยู่ในระดับค่อนข้างดี โดยมีค่า Accuracy อยู่ที่ประมาณ 75 % โดยค่า Threshold ที่มีความเหมาะสมในกรณีนี้คือ 0.9 ซึ่งจากค่าความถูกต้องในระดับดังกล่าวยังอยู่ในระดับที่ไม่สามารถใช้งานเพื่อการยืนยันตัวตนด้วยเสียงได้อย่างสมบูรณ์ จึงยังต้องมีการพัฒนาต่อไป อย่างไรก็ตามสามารถใช้การยืนยันตัวตนด้วยเสียงควบคู่กับการยืนยันตัวตนแบบหลายปัจจัยอื่น ๆ เช่น การยืนยันตัวตนด้วยรหัสผ่าน เพื่อเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นในการยืนยันตัวตน ดังนั้น การวิจัยและพัฒนาในเรื่องดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต่อไปในอนาคต

นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาวิจัยต่อไปเกี่ยวกับการเปรียบเทียบยืนยันตัวตนระหว่างการยืนยันตัวตนด้วยลายนิ้วมือและการยืนยันตัวตนด้วยเสียง เนื่องจากปัจจุบันลายนิ้วมือถูกใช้อย่างแพร่หลายจนเป็นที่ยอมรับ หากมีการพัฒนาเชิงเปรียบเทียบกับลายนิ้วมือ และหากผลลัพธ์การยืนยันตัวตนด้วยเสียงใกล้เคียงกับลายนิ้วมือ จะทำให้การยืนยันด้วยเสียงได้รับความน่าเชื่อถือมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กองทัพอากาศที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองทัพอากาศ. (2563). ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2563). สืบค้น 12 มีนาคม 2565, จาก www.rtaf.mi.th/Documents/Publication/RTAF%20Strategy_Final_04122563.pdf
- [2] Manikandan, K., & Chandra, E. (2016). Speaker Identification using a Novel Prosody with Fuzzy based Hierarchical Decision Tree Approach. *Indian Journal of Science and Technology*. 9: 44.
- [3] Dhakal, P., Damacharla, P., Javaid, A. Y., & Devabhaktuni, V. (2019). A Near Real-Time Automatic Speaker Recognition Architecture for Voice-Based User Interface. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 1: 504 - 520.

- [4] The Math Works, Inc. (1994). Speaker Identification Using Pitch and MFCC. Retrieved on May 5, 2022, from <https://www.mathworks.com/help/audio/ug/speaker-identification-using-pitch-and-mfcc.html>
- [5] Zaharchuk, G., Gong, E., Wintermark, M., et al. (2018). Deep learning in neuroradiology. *AJNR Am J Neuroradiol.* 39: 1776 - 1784.
- [6] Tirumala, S.S., Shahamiri, S. R., Garhwal, A. S., & Wang, R. (2017). Speaker identification features extraction methods: A systematic review. *Expert Systems with Applications.* 90: 250 - 271.
- [7] พายัพ ศิรินาม. (2562). การพัฒนาโมเดลการเรียนรู้เสียงเชิงลึกสำหรับงานด้านสงครามไซเบอร์ (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช.
- [8] Adrian Rosebrock. (2020). GANs with Keras. Retrieved on May 12, 2022, from <https://pyimagesearch.com/2020/11/16/gans-with-keras-and-tensorflow/>
- [9] Vassil Panayotov. (2015). LibriSpeech. Retrieved on June 6, 2022, from <https://paperswithcode.com/dataset/librispeech>
- [10] Ambient Sound TH. (2565). เสียงคนงานกำลังทำงานก่อสร้าง. Retrieved on June 6, 2022, from https://www.youtube.com/watch?v=3mpmmCqx9fo&ab_channel=AmbientSound%E2%80%8BTTH

การศึกษาเปรียบเทียบตัวจำแนกสำหรับการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร

A Comparative Study of Classifiers for Analyzing Agricultural Land Use

¹ปัทกร อันชื่น, ^{2*}ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง และ ³ประสาทร วงษ์คำซัง^{1,3}สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช²กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Received : June 10, 2022

Revised : October 19, 2022

Accepted : December 20, 2022

¹Patikorn Anchuen, ^{2*}Phummipat Daungklang and ³Prasatporn Wongkamchang^{1,3}The Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy²Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Patikorn_an@rtaf.mi.th, *Phummipat_d@rtaf.mi.th, Prasatporn_w@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวจำแนกสำหรับการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรจากภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial Photographic) เพื่อลดภาระเจ้าหน้าที่ในการสำรวจพื้นที่ทำเกษตรแบบผสมผสาน ขั้นตอนวิธีที่ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทางด้านการระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ได้แก่ Maximum Likelihood (ML) Support Vector Machine (SVM) และ Random Forest (RF) ถูกนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกประเภทพืชพรรณทางการเกษตร ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red band) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR band) จะถูกบันทึกจากกล้องถ่ายภาพชนิดพิเศษที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) เพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) ผลการศึกษาพบว่าขั้นตอนวิธี RF มีความแม่นยำมากที่สุดถึง 93 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: ภาพถ่ายทางอากาศ, อากาศยานไร้คนขับ, ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ, การใช้ประโยชน์ที่ดิน

Abstract

This paper focuses on a comparative study of the accuracy of classifiers for aerial photographic land use to reduce staff burden in surveying areas of integrated agriculture. The widest algorithms are used for object classification in the field of geographic information systems consisting of Maximum Likelihood (ML), Support Vector Machine (SVM) and Random Forest (RF). These algorithms are benchmarked for the classification of agricultural land. An aerial photograph is captured by cameras mounted on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to record the Red band image and near-infrared (NIR) image to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). As a result, the RF algorithm is the most accurate, equal to 93 percent.

Keywords: Aerial photographic, UAV, NDVI, Land use

1. บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณที่ความเหมาะสมกับการทำเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทางการเกษตร การเกษตรเพื่อเป็นอาหารและสร้างรายได้ในครัวเรือน ตลอดจนต้องออกไปสู่ภาคการผลิต เพื่อส่งออกสินค้าทางการเกษตร ในการสร้างรายได้ให้กับประเทศ [1] จากอดีตจนถึงปัจจุบันพืชเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมเพาะปลูกอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยมีจุดเริ่มต้นจากวิถีเกษตรเพื่อปากท้องไปสู่วิถีเกษตรแบบยั่งยืน ควบคู่ไปกับการพัฒนาการทำเกษตรกรรม [2] ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีที่ทันสมัยนำไปสู่ชีวิตความเป็นอยู่ของคนในสังคมที่ดีขึ้น ในขณะที่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและการพัฒนานวัตกรรมทางด้านการเกษตรนำไปสู่ยุคเกษตรสมัยใหม่ที่จะช่วยยกระดับเกษตรกรให้มีรายได้เพิ่มขึ้น [3] ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางอากาศสามารถนำมาใช้เพื่อช่วยจัดการพื้นที่ในการเพาะปลูก เพิ่มคุณภาพและปริมาณของผลผลิต ด้วยการปรับกลยุทธ์จากการวิเคราะห์พื้นที่ให้สอดคล้องกับการเพาะปลูก ทั้งทรัพยากรที่มี และระยะเวลาที่เหมาะสม นอกจากนี้เทคโนโลยีทางด้านเซ็นเซอร์การตรวจวัดที่ถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับกลยุทธ์การปลูกพืชให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมได้ [4] นอกจากนี้การมาถึงของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้รองรับการเชื่อมต่อด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในปริมาณมหาศาล ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการตรวจวัดจากอุปกรณ์ Internet of Thing ได้เป็นอย่างดี และยิ่งไปกว่านั้นเครือข่ายยังรองรับการให้บริการเพื่อควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกล ซึ่งก่อให้เกิดการยกระดับการทำการเกษตร ไปสู่การเกษตรอัจฉริยะหรือ Smart Agriculture บนพื้นฐานที่สามารถรองรับได้บนเครือข่ายไร้สายยุคใหม่ [5]

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีทางการเกษตรก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการจัดการผลผลิตทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพ และสามารถรักษาคุณภาพผลผลิตให้เป็นมาตรฐาน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีสารสนเทศและภาพถ่ายทางอากาศเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่สำคัญที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อช่วยขับเคลื่อนภาคการเกษตรของประเทศ การศึกษาและพัฒนานวัตกรรมเพื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านการพยากรณ์ผลผลิต การจัดการการเพาะปลูก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการได้มาซึ่งภาพถ่ายทางอากาศจากดาวเทียมมีต้นทุนสูง และมีข้อจำกัดในการใช้งาน จึงส่งผลให้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) เพื่อช่วยลดต้นทุนอีกทั้งมีความคล่องตัวสูงในการบันทึกภาพและวิดีโอ [6]

อากาศยานไร้คนขับถูกนำมาใช้งานทางด้านการเกษตรอย่างแพร่หลาย การใช้งานเพื่อบันทึกภาพจากมุมสูงในการสำรวจพื้นที่ทำการเกษตรเป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานของระบบภาพถ่ายทางอากาศ โดยข้อมูลที่ได้อาจถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิต นอกจากนี้ยังมีการนำอากาศยานไร้คนขับไปใช้ในการหว่านเมล็ดพันธุ์ หว่านปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลง ซึ่งนับว่าได้ก้าวเข้าสู่การเป็นเกษตรสมัยใหม่อย่างเต็มตัว [7] ในประเทศไทยอากาศยานไร้คนขับมีบทบาทมากยิ่งขึ้นในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรกรรมแบบแม่นยำ เพื่อลดข้อจำกัดของพืชบางประเภทที่มีความสูงรวมไปถึงการให้ปุ๋ยผ่านทางปากใบกับพืชบางประเภทได้ทันที โดยไม่ต้องผ่านทางราก ทำให้ประหยัดเวลา และลดการใช้แรงงานคน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคนในการทำการเกษตรเพียงอย่างเดียวจะใช้แรงงานมากกว่า ในขณะที่การใช้อากาศยานไร้คนขับจะใช้แรงงานคนในการควบคุมและดำเนินการเพียง 1-2 คนเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการทำการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8]

การเกษตรแบบผสมผสานเป็นหนึ่งในวิธีการทำเกษตรที่ได้รับความนิยมในยุคปัจจุบันซึ่งช่วยแบ่งพื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ก่อให้เกิดความมั่นคง มีอยู่ มีกิน และมีใช้ การใช้พื้นที่ในการทำเกษตรที่สมดุลจะทำให้สามารถสร้างผลผลิตที่คึกคักนำไปสู่ความยั่งยืนได้ ในการจัดสรรพื้นที่ทำการเกษตรแบบผสมผสานจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ทั้งสภาพแวดล้อม ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ น้ำ ดิน ซึ่งต้องใช้ข้อมูลสารสนเทศจากหลายแหล่ง ก่อให้เกิดข้อจำกัดในการได้รับข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) เป็นหนึ่งตัวบ่งชี้

ที่ถูกคำนวณได้จากข้อมูลภาพในช่วงคลื่นแสงสีแดงและช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกความสมบูรณ์ของพืชพรรณ และใช้เป็นตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณในด้านต่าง ๆ ในปัจจุบันการทราบถึงข้อมูล NDVI เชิงพื้นที่ที่สามารถดำเนินการ ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพกับอากาศยานไร้คนขับเพื่อบินสำรวจแทนการใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม ทำให้มีความสะดวก รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพื้นที่ [9] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสนใจกับการนำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของ NDVI มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมระบบ สารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมในการนำมา ประยุกต์ใช้ประโยชน์ด้านการพยากรณ์ผลผลิตแปลงข้าวได้เป็นอย่างดี ช่วยให้สามารถวางแผน เพื่อจัดสรรที่ดินในการ เพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10] นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพ NDVI ยังถูกนำไปใช้จำแนกข้อมูลเชิงวัตถุ ในการวิเคราะห์ข้อมูลแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกและพิจารณาพร้อมกับค่าดัชนีอื่น ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำแผนที่ [11] ความสัมพันธ์ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้น โดยใช้ค่า NDVI นอกจากนี้ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนยังสามารถคำนวณได้จาก NDVI ซึ่งช่วยให้ประหยัดงบประมาณและค่าใช้จ่ายที่จะต้อง ใช้เจ้าหน้าที่ในการสำรวจ [12] อย่างไรก็ตามการทำเกษตรแบบผสมผสานจำเป็นต้องได้รับการจัดสรรพื้นที่เพาะปลูกอย่างเหมาะสม ดังนั้นการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางด้านการเกษตรด้วยตัวจำแนกข้อมูลที่มีความแม่นยำจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำ ข้อมูลไปใช้ในการจัดสรรพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาเปรียบเทียบตัวจำแนกสำหรับการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรจาก ข้อมูลภาพ NDVI ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์และจัดสรรที่ดินโดยใช้โปรแกรม ทางด้านระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ จากการศึกษาขั้นตอนวิธี Maximum Likelihood (ML) Support Vector Machine (SVM) และ Random Forest (RF) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายบนพื้นฐานในการวิเคราะห์เชิงวัตถุ ขั้นตอนวิธีเหล่านี้ ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดในการเลือกใช้งาน ซึ่งช่วยลดภาระเจ้าหน้าที่และงบประมาณในการสำรวจ พื้นที่ทำการเกษตร

2. ขอบเขตงานวิจัย

เพื่อประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับสำหรับการจำแนกประเภทของพืชเศรษฐกิจด้วย NDVI และเปรียบเทียบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีของ ML SVM และ RF สำหรับการจำแนกพืชพรรณทางการเกษตร

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

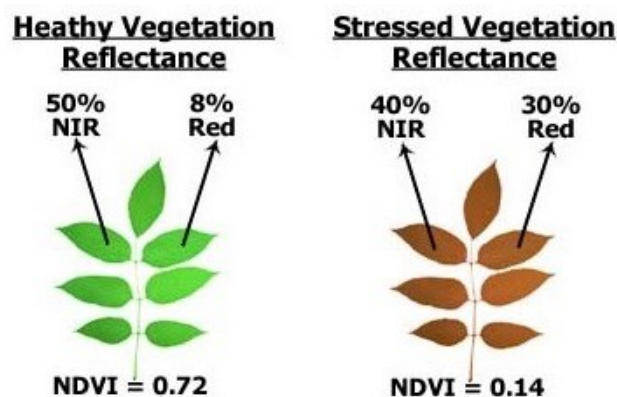
3.1 ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ

ดัชนีพืชพรรณเป็นค่าที่บ่งบอกการสะท้อนคลื่นแสงที่ตกกระทบกับสิ่งที่ปกคลุมพืชพรรณในสัดส่วนที่ต่างกัน ตามช่วงเวลา ด้วยใบพืชจะดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่แสงสีแดง และคลื่นแสงอินฟราเรดใกล้ค่าดัชนีพืชพรรณ ของพืชแต่ละชนิด มีความแตกต่างกันตามความอุดมสมบูรณ์และสีของใบที่มีการดูดซับ การสะท้อนพลังงานคลื่นที่ต่างกัน โดยที่ค่า NDVI สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

กำหนดให้	NDVI	คือ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ
	NIR	คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้
	Red	คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของค่า NDVI อยู่ในช่วงระหว่าง -1.00 ถึง 1.00 โดยสามารถตีความระดับพืชพรรณจากค่าที่วัดได้ในแต่ละพื้นที่ เช่น ค่า NDVI ที่อยู่ระหว่าง -1.00 ถึง 0.29 จะถูกตีความว่าเป็นพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมน้อยหรือเป็นแหล่งน้ำ ช่วงค่า 0.30 ถึง 0.59 เป็นพื้นที่ที่มีพืชพรรณที่หนาแน่นน้อย และช่วงค่า 0.60 ถึง 1.00 เป็นพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่นมาก อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ พิจารณช่วงที่มีค่า NDVI มากกว่า 0 ถูกบ่งชี้ได้ว่าบริเวณพื้นที่นั้น เป็นพื้นดินซึ่งอาจจะมีพืชพรรณปกคลุมอยู่ ในการใช้ NDVI เพื่อจำแนกพืชพรรณ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจวัดความอุดมสมบูรณ์ของพืชได้ด้วยการที่พืชที่มีใบเขียวที่มีความแข็งแรงสมบูรณ์จะให้ค่า NDVI ที่สูงกว่าพืชที่มีความสมบูรณ์น้อยกว่า ดังแสดงตามรูปที่ 1



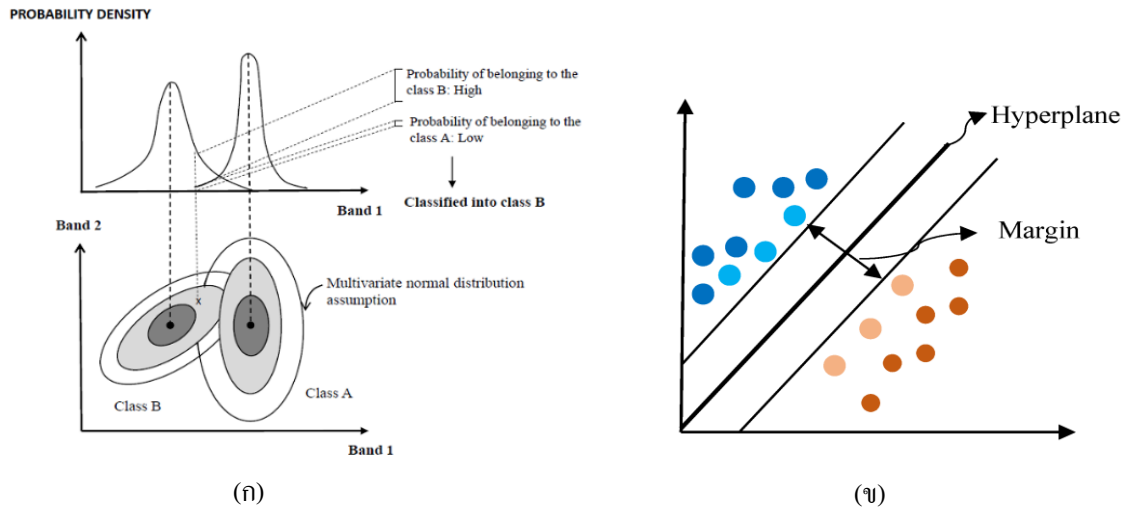
รูปที่ 1 ค่า NDVI ของพืชพรรณที่มีความสมบูรณ์แตกต่างกัน [13]

ทั้งนี้ พืชพรรณที่ปกคลุมดินมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตามช่วงเวลา โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจที่มีการเพาะปลูกตามช่วงเวลาทั้งในระหว่างการเติบโตไปจนถึงเก็บเกี่ยวผลผลิต มีการส่งผลกระทบต่อค่า NDVI ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงไม่สามารถที่จะใช้เพียงช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งสำหรับการพิจารณา NDVI แต่จะขึ้นอยู่ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลภาพถ่าย อย่างไรก็ตามการปลูกพืชเศรษฐกิจสำหรับการเกษตรแบบผสมผสานโดยพืชที่ปกคลุมดินแต่ละชนิด เช่น ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้นส่วนใหญ่มีการสะท้อนและดูดซับพลังงานคลื่นแสงสีแดง และคลื่นอินฟราเรดใกล้ที่แตกต่างกัน จึงทำให้สามารถนำภาพถ่ายทางอากาศมาวิเคราะห์ภาพ NDVI เพื่อจำแนกพืชพรรณ

3.2 การแบ่งส่วนรูปภาพ

ในการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่จำเป็นต้องมีข้อมูลอ้างอิง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศไร้คนขับ ในขณะที่เดียวกันการเก็บข้อมูลภาคสนามจะทำการสุ่มเก็บในแต่ละจุด เพื่อใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบความถูกต้องในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถกำหนดพื้นที่ตัวอย่างได้จากข้อมูลที่ต้องการสำรวจ โดยมีประเภทของพืชพรรณที่ปกคลุมดินจากการสะท้อนเชิงสเปกตรัมที่แตกต่างกัน จะถูกนำมาใช้จำแนกการใช้ที่ดินผ่านขั้นตอนวิธีการในการจำแนกข้อมูลประเภทต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการใช้ขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธีบนพื้นฐานในการวิเคราะห์เชิงวัตถุ เพื่อค้นหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางด้านการเกษตรโดยประกอบด้วย Maximum Likelihood (ML) Support Vector Machines (SVM) และ Random Forest (RF) (ดังรูปที่ 2) อย่างไรก็ตามข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ นั้น การที่จะนำไปใช้เรียนรู้เพื่อสร้างตัวจำแนกจากขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี จำเป็นต้องมีกระบวนการแบ่งส่วนรูปภาพ เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ตัวอย่างในการใช้เรียนรู้ (Training Sample) โดยผ่านวิธีการ Mean Shift

การแบ่งส่วนรูปภาพด้วยวิธีการ Mean Shift เป็นการจัดกลุ่มที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานความหนาแน่นด้วยการประมาณการแบบ Kernel Density Estimation (KDE) สำหรับหาตัวแทนกลุ่มของข้อมูล ด้วยเทคนิคนี้ใช้ Moving Window เพื่อคำนวณค่าพิกเซลเฉลี่ย (Average Pixel) ในการกำหนดพิกเซลที่ควรอยู่ร่วมกับแต่ละส่วนภาพ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการจำแนกกลุ่มของจุดภาพด้วยวิธี ML SVM และ RF

- (ก) ตัวอย่างการจำแนกกลุ่มของจุดภาพด้วย Maximum Likelihood (ML) [14]
 (ข) ตัวอย่างการจำแนกข้อมูลด้วย Support Vector Machines (SVM) [15]
 (ค) ตัวอย่างการจำแนกข้อมูลด้วย Random Forest (RF) [16]

3.3 การจำแนกประเภทข้อมูล

การจำแนกประเภทข้อมูลเป็นการแบ่งจุดภาพที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันออกเป็นกลุ่มเพื่อแยกวัตถุในภาพที่มีความแตกต่างออกจากกัน โดยอาศัยหลักการทางสถิติช่วยพิจารณาพร้อมกับการเรียนรู้ของเครื่อง ในการจำแนกข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ สามารถแบ่งการจำแนกประเภทข้อมูลได้ 2 รูปแบบ คือ การจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแล และการจำแนกข้อมูลแบบไม่กำกับดูแล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับควบคู่กับข้อมูลภาคสนามเพื่อใช้อ้างอิง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนวิธีในการจำแนกข้อมูลแบบกำกับดูแล แต่ด้วยข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมีปริมาณที่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยม และสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วย 3 ขั้นตอนวิธี ซึ่งอธิบายได้ ดังนี้

Maximum Likelihood เป็นตัวจำแนกที่อาศัยพารามิเตอร์ทางสถิติ (Parametric Statistical) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยจะพิจารณาจากค่า NDVI ของแต่ละจุดภาพด้วยค่าเฉลี่ย และความแปรปรวน สำหรับเป็นเกณฑ์ในการจัดกลุ่ม ทุกจุดภาพ ซึ่งอาศัยหลักการของความน่าจะเป็นเพื่อพิจารณาว่าหากจุดภาพอยู่ในคลาสที่มีความถี่ของความน่าจะเป็นมากที่สุด จะถูกประเมินให้เป็นคลาสนั้น ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 (ก)

Support Vector Machine เป็นการจำแนกข้อมูลแบบปราศจากพารามิเตอร์ทางสถิติ (Non-Parametric Statistical) ซึ่งจะอาศัยข้อมูลเพื่อสร้าง Hyperplane สำหรับช่วยจำแนกข้อมูล โดยมี Kernel Function ในการสร้างขีดจำกัดในการตัดสินใจระหว่างการจำแนกจุดภาพในแต่ละคลาส ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 (ข) จากตัวอย่างการใช้ Linear Kernel เพื่อจำแนกข้อมูลที่อยู่ระหว่าง Hyperplane ที่ถูกสร้างขึ้น โดยข้อมูลที่ถูกจำแนกจะมีระยะห่างของ Margin เพื่อกำหนดขีดจำกัดในการตัดสินใจ

Random Forest เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการจำแนกข้อมูลที่ได้รับคามนิยมกันอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิจัย ซึ่งมีความต้องการชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการเรียนรู้ไม่มาก เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่น เช่น ML โดยมีการรวมกลุ่มของ Decision Tree เพื่อแก้ไขจุดอ่อนของของขั้นตอนวิธีเดิมให้มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลมากยิ่งขึ้น การตัดสินใจในการจำแนกข้อมูล จะถูกดำเนินการจากผลลัพธ์ของคลาสที่มากที่สุด โครงสร้างของ RF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 (ค)

3.4 การประเมินประสิทธิภาพตัวจำแนก

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวจำแนก ซึ่งเป็นการประเมินความสามารถของขั้นตอนวิธีแต่ละแบบหลังผ่าน กระบวนการเรียนรู้ด้วยตัวชุดข้อมูลทดสอบ จำเป็นต้องพิจารณา Confusion Matrix ซึ่งมีค่าที่สำคัญ ประกอบด้วย True Positive (TP) คือ การทำนายความถูกต้องตามค่าที่คาดหวัง False Positive (FP) คือ การทำนายที่ไม่ถูกต้องเนื่องจาก ข้อมูลจริงไม่อยู่ในคลาสแต่ผลการทำนายตัดสินใจว่าอยู่ในคลาส True Negative (TN) คือ ผลการทำนายถูกต้องแต่ไม่อยู่ในคลาส และ False Negative (FN) คือ ผลการทำนายไม่ถูกต้องและไม่อยู่ในคลาส อย่างไรก็ตามตัวชี้วัดที่สามารถบอกความเที่ยงตรง ในการทำนายผลของโมเดลได้ คือ การนำเอา TP รวมกับ TN หาคด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ซึ่งจะเรียกว่าค่าความแม่นยำ (Accuracy) ดังที่แสดงในสมการที่ (2)

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2)$$

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ข้อมูล และเครื่องมือ

งานวิจัยนี้ดำเนินการบนพื้นฐานของการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศควบคู่กับการเก็บข้อมูลภาคพื้น เพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร กล้องบันทึกภาพและกล้องอินฟราเรดใกล้ถูกนำไปติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ เพื่อบันทึกภาพถ่ายในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red band) และภาพถ่ายในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR band) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งภาพดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณ NDVI เพื่อใช้ในการจำแนกพืชพรรณด้วยขนาดพิกเซลที่เท่ากันทั้งสองภาพ นอกจากนี้การถ่ายภาพทางอากาศ จำเป็นต้องมีการกำหนดช่วงความสูง ช่วงเวลาในการถ่ายภาพ ตลอดจนสภาพอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้มีค่าคุณลักษณะเชิงคลื่นของภาพที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำภาพถ่ายทางอากาศไปใช้งาน อย่างไรก็ตามการดำเนินการจำแนกพืชพรรณแต่ละชนิดจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอ้างอิงภาคพื้น และขั้นตอนวิธีในการจำแนกที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวม จะถูกดำเนินการด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ทางด้านเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR band)
และในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red band)

(ก) ภาพ NIR จากอากาศยานไร้คนขับ

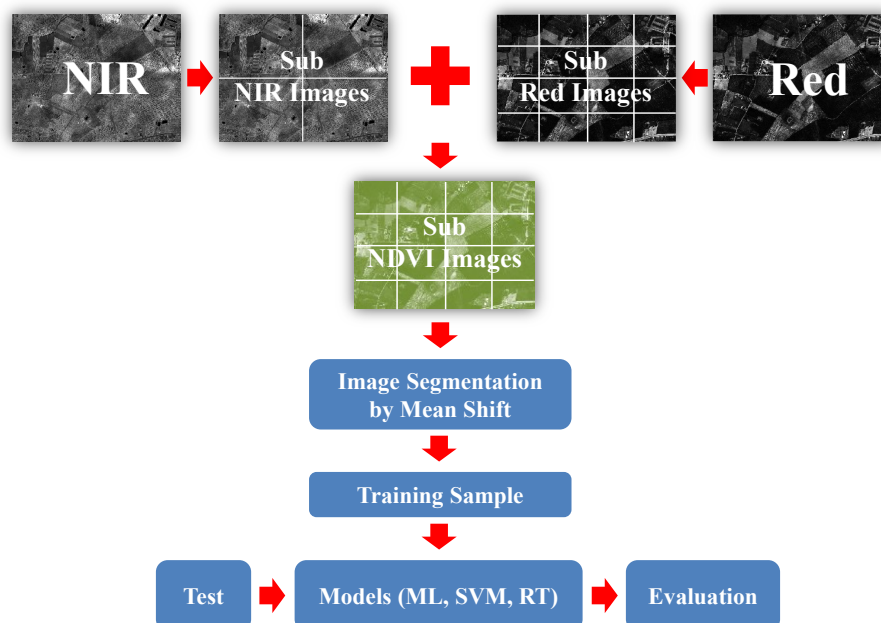
(ข) ภาพ Red จากอากาศยานไร้คนขับ

4.2 รายละเอียดพื้นที่การศึกษา

การเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยการถ่ายภาพทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับถูกกำหนดให้ใช้พื้นที่ในการสำรวจ 100 ตารางกิโลเมตรในพื้นที่ศึกษาโดยมีการกำหนดความสูง ช่วงเวลาในการถ่ายภาพที่เหมาะสมควบคู่ไปกับการสำรวจภาคพื้น เพื่อเก็บข้อมูลพืชพรรณชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิง อย่างไรก็ตามการบันทึกภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับไม่สามารถรองรับการระบุตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำ จึงไม่สามารถปรับคุณลักษณะเชิงคลื่นของภาพให้มีความต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากพิกัดในการถ่ายภาพตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับ และตำแหน่งดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งยากต่อการชดเชยแสง ส่งผลให้ภาพที่ได้มีความเข้มและความสว่างของแสงแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับจะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการ Image Splitting เพื่อแบ่งภาพที่มีคุณลักษณะเชิงคลื่นที่คล้ายกันก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ เพื่อสร้างตัวจำแนกในแต่ละขั้นตอนวิธี โดยมีการพิจารณาภาพเพื่อ Splitting ออกเป็นภาพย่อย ๆ จำนวนมาก ซึ่งแต่ละภาพจะมีขนาดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเชิงคลื่น โดยคุณลักษณะเชิงคลื่นที่คล้ายกันจะถูกพิจารณาให้เป็นภาพย่อยเดียวกัน

4.3 การดำเนินงานวิจัย

กระบวนการสร้างระบบตีความภาพถ่ายทางอากาศในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4 ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ และค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดงที่ถูกถ่ายได้จากอากาศยานไร้คนขับจะถูกนำมาแบ่งภาพแล้วคำนวณค่า NDVI เพื่อนำไปแบ่งส่วนรูปภาพด้วยวิธีการ Mean Shift สำหรับเข้าสู่ขั้นตอนการจัดทำ Training Sample สำหรับใช้ในการสร้างตัวจำแนก จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างตัวจำแนกประเภทข้อมูล เพื่อทำการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ ML SVM และ RF โดยการเปรียบเทียบจากความแม่นยำในการทำนาย เพื่อค้นหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4 กระบวนการสร้างระบบตีความภาพถ่ายทางอากาศเพื่อจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร

5. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการเก็บข้อมูลพืชเศรษฐกิจ 3 ชนิดได้แก่ อ้อย ขางพารา และมันสำปะหลัง โดยข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมจากอากาศยานไร้คนขับจะถูกดำเนินการผ่านกระบวนการที่ได้ออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ ArcGIS เพื่อดำเนินการในงานวิจัย ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึง Confusion Matrix ของแต่ละขั้นตอนวิธีซึ่งให้ประสิทธิภาพในการจำแนกแตกต่างกันโดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 สำหรับผลลัพธ์ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรด้วยขั้นตอนวิธี ML SVM และ RF ตามลำดับ

การตรวจสอบความแม่นยำของตัวจำแนกด้วยการใช้ชุดข้อมูลส่วนที่มีคำตอบแต่ไม่ผ่านขั้นตอนการเรียนรู้ จำนวน 500 ชุด ซึ่งเป็นจำนวนที่มีความเหมาะสมต่อการประมวลผลและมีการกระจายคลาสของข้อมูลพืชพรรณทั้ง 3 ชนิดอย่างเหมาะสมเพื่อให้ข้อมูลไม่เอนเอียงไปยังคลาสใดคลาสหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกการให้ Accuracy ของ ML SVM และ RF เท่ากับ 81 80 และ 93 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของ RF ที่ให้ค่าความแม่นยำมากกว่า ML และ SVM ในการจำแนกพืชเศรษฐกิจทั้ง 3 ชนิด อย่างไรก็ตาม ML เป็นขั้นตอนวิธีแบบ Parametric Statistical ซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับค่าเฉลี่ย และความแปรปรวนเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนก หากข้อมูลในการจำแนกคลาสมีความใกล้เคียงกันมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพถึงวิธีดังกล่าวที่ด้อยลง สำหรับ SVM เป็นวิธีการแบบ Non-Parametric Statistical ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ Kernel Function ที่เป็นเกณฑ์ ในขณะที่วิธีการ RF เป็นการรวมกลุ่มของวิธีการ Decision Tree เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการเรียนรู้จำนวนมากแต่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนจำกัด ตลอดทั้งค่าคุณลักษณะที่ใช้เพียง NDVI ซึ่งมีการดำเนินการผ่านกระบวนการ Image Segmentation ด้วยวิธีการ Mean Shift เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างตัวจำแนกทั้ง 3 ขั้นตอนวิธี โดยพบว่า ความแม่นยำโดยรวมในแต่ละขั้นตอนวิธีมีค่า 80 เปอร์เซนต์ขึ้นไป ทั้ง 3 ขั้นตอนวิธี สามารถที่จะจำแนกอ้อยได้ถูกต้องทั้งหมด แต่มีความแม่นยำในการจำแนกมันสำปะหลังต่ำ ในขณะที่ขั้นตอน SVM สามารถจำแนกขางพาราได้ดีกว่าขั้นตอนวิธีทั้งสอง อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานเพื่อจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรอาจมีคลาสที่แตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ตลอดทั้งขั้นตอนวิธีทั้ง 3 มีคุณลักษณะความต้องการข้อมูลแตกต่างกัน ดังนั้นในการนำไปใช้งาน ควรมีการฝึกฝนตัวจำแนก เพื่อค้นหาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งานสำหรับแต่ละพื้นที่

ตารางที่ 1 ความแม่นยำของการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Maximum Likelihood

cMatrix	อ้อย	ยางพารา	มันสำปะหลัง	Total	U_Accuracy (%)
อ้อย	310	0	0	310	100
ยางพารา	15	93	6	114	82
มันสำปะหลัง	70	3	3	76	4
Total	395	96	9	500	-
P_Accuracy (%)	78	97	33	-	81

ตารางที่ 2 ความแม่นยำของการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Support Vector Machine

cMatrix	อ้อย	ยางพารา	มันสำปะหลัง	Total	U_Accuracy (%)
อ้อย	302	0	0	302	100
ยางพารา	23	95	11	129	74
มันสำปะหลัง	66	0	3	69	4
Total	391	95	14	500	-
P_Accuracy (%)	77	100	21	-	80

ตารางที่ 3 ความแม่นยำของการจำแนกข้อมูลด้วยวิธี Random Forest

cMatrix	อ้อย	ยางพารา	มันสำปะหลัง	Total	U_Accuracy (%)
อ้อย	371	0	0	371	100
ยางพารา	11	90	6	107	84
มันสำปะหลัง	19	0	3	22	14
Total	401	90	9	500	-
P_Accuracy (%)	93	100	33	-	93

6. สรุป

การศึกษาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร จากข้อมูลภาพถ่าย NDVI ที่ประกอบด้วย ML SVM และ RF ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่มีการใช้งานทางด้านระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์อย่างแพร่หลาย บนพื้นฐานในการวิเคราะห์เชิงวัตถุ พบว่า ขั้นตอนวิธี RF มีความแม่นยำในการจำแนกวัตถุ 93 เปอร์เซ็นต์ จากการจำแนกพืชเศรษฐกิจทั้ง 3 ชนิด บนพื้นฐานของชุดข้อมูลของงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานจริง จำเป็นต้องมีการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนก เพื่อเลือกใช้ขั้นตอนวิธีที่มีความเหมาะสมในแต่ละครั้ง โดยงานวิจัยนี้ช่วยลดภาระในการสำรวจพื้นที่ของเจ้าหน้าที่ และช่วยวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ขั้นตอนวิธีในงานวิจัยยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการพิจารณาพืชพรรณอื่น ๆ ที่มีคุณลักษณะของ NDVI ที่แตกต่างกันได้อีกด้วย

7. ข้อเสนอแนะ

เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการเก็บข้อมูลอื่น ๆ เช่น ดัชนีสถานะพืชพรรณ (VCI) ดัชนีสถานะความอุดมสมบูรณ์ของพืชพรรณ (VHI) และดัชนีสถานะอุณหภูมิ (TCI) เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างตัวจำแนกจะก่อให้เกิดการบริหารจัดการได้อย่างตรงจุด

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (2564). พิเศษธุรกิจสินค้าสร้างรายได้ในครัวเรือนและประเทศ สืบค้น 2 สิงหาคม 2564, จาก https://www.arda.or.th/knowledge_detail.php?id=40
- [2] กิตติศักดิ์ ทองมีทิพย์. (2564). พัฒนาการเกษตรกรรมของประเทศไทย: ในมิติด้านการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต. วารสารพัฒนศาสตร์ วิทยาลัยพัฒนศาสตร์ ป๋วย อึ๊งภากรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 4(1): 132-162.
- [3] สนิษฐา คุรุทเมือง แสนเสริม และคณะ. (2564). การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการผลิตพืชเศรษฐกิจของเกษตรกร. วารสารเกษตร มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 3(1): 31-44.
- [4] จิตติพงษ์ บุญบาและคณะ. (2560). ต้นแบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อการเกษตร. ในการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิชาการระดับชาติ UTCC Academic Day ครั้งที่ 2 (1945-1955). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.
- [5] Ming Li and Buwajian Abula. (2020). Evaluation of Economic Utility of Smart Agriculture Based on 5G Network and Wireless Sensors. Retrieved on July 15, 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103485>
- [6] รัฐพล พรหมมาศ. (2564). การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนบินในการจัดการด้านปัญหาสิ่งแวดล้อม: กรณีศึกษาปัญหากัญชาไฟป่าและมลพิษทางอากาศจังหวัดเชียงใหม่. วารสารศิลปศาสตร์และอุตสาหกรรมบริการ, 4(2): 123-132.
- [7] The Thai Chamber of Commerce and Board of Trade of Thailand. (2018). Drones for agriculture is coming to create new options in the age of agriculture 4.0. Retrieved on July 8, 2021, from <https://thaichamber.org/public/upload/file/document/1103171509698871.pdf>
- [8] ฐานเศรษฐกิจ มัลติมีเดีย. (2560). โดรนเพื่อการเกษตรทางเลือกใหม่ในยุคเกษตร 4.0. สืบค้น 2 กันยายน 2564, จาก <https://www.thansettakij.com/content/business/216961>
- [9] ชัยญญาวัจน์ สติถัทธสมบัตติ และ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง. (2564). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์ในการติดตามอากาศยานสำหรับการค้นหาและช่วยชีวิต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ, 17(1): 60-70.
- [10] พงศ์ หลวงมูล และ ฉาวร อ่อนประไพ. (2564). การประมาณผลผลิตข้าวด้วยค่าดัชนีพืชพรรณโดยใช้ข้อมูลภาพแบบหลายช่วงคลื่นจากอากาศยานไร้คนขับ. วารสารเกษตร, 37(2): 193-205.
- [11] ภาติยะ พัฒนาศักดิ์. (2562). การทำแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยการจำแนกข้อมูลเชิงวัตถุจากภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต. วารสารวิชาการเพื่อพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่, 1(2), 83-90.
- [12] ขวัญชัย ชัยอุดม และคณะ. (2558). รูปแบบความสัมพันธ์ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับดัชนีพืชพรรณของป่าดิบเขาต่ำ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์จังหวัดเชียงใหม่. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 11(1): 27-35.
- [13] Chaipat ncm. (2019). Vegetation Change Detection. Medium, Retrieved on July 8, 2021, from <https://medium.com/geo-datascience/vegetation-change-detection-517ab0a582f6>
- [14] Alzate, B. E. (2011). Imágenes espaciales de la superficie terrestre. Procesamiento digital, análisis y extracción de información temática. Notas de clase. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [15] Chen, Y., Ma, L., Yu, D., Feng, K., Wang, X. and Song, J. (2022). Improving Leaf Area Index Retrieval Using Multi-Sensor Images and Stacking Learning in Subtropical Forests of China. *MDPI journals*. 14(1): 148.
- [16] Hernández-Blanco, A., Herrera-Flores, B., Tomás, D. and Navarro-Colorado, B. (2019). A systematic review of deep learning approaches to educational data mining. *Hindawi journal*. volume 2019, article ID 9316123.

การจัดกลุ่มหน่วยประมวลผลแบบ เอ็กทรา-จีซีเอส เพื่อการสื่อสารแบบเพอร์ซันนัลไลซ์ ออล-ทู-ออล บนเครือข่ายการเชื่อมต่อไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น

A Grouping of Processors with Extra-GCS Combination for Parallel ATAPE on Hierarchical Hypercube Systems

^{1*} นันทิพัฒน์ พิศุทธางกูร และ ^{2#} เฉลิมขวัญ สิริพันธุ์

^{1,2}ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*} Nuntipat Phisutthangkoon and ^{2#} Chalermkwan Siripanth

^{1,2}Department of Computer Science, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

*nuntipat_phis@rtaf.mi.th, #chalermkwan_s@rtaf.mi.th

Received : August 17, 2022

Revised : October 19, 2022

Accepted : December 20, 2022

บทคัดย่อ

เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น (Hierarchical Hypercube Systems : HHCs) เป็นหนึ่งในเครือข่ายที่ได้รับความนิยมอย่างมากในระบบประมวลผลสมรรถนะสูง (High Performance Computing) เนื่องจากสามารถขยายขนาดได้ง่าย อีกทั้งมีราคาในการสร้างที่ถูกกว่าเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์ (Hypercube Systems : HCs) แบบปกติ อย่างไรก็ตาม สำหรับการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบขนานบน HHCs ยังมีความซับซ้อน และอาจจะมีการชนกันของข้อมูล (Data Collision) เนื่องจาก HHCs มีการลดเส้นเชื่อมระหว่างหน่วยประมวลผลลง ดังนั้น หากปัญหาดังกล่าวได้รับการแก้ไข จะทำให้ HHCs มีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปสร้างลงบนชิปของระบบมัลติโพรเซสเซอร์ (Multiprocessors) ที่รองรับการประมวลผลแบบขนาน เช่น การแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบเพอร์ซันนัลไลซ์ ออล-ทู-ออล (All-to-All Personalized Exchange: ATAPE) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเสนอการจัดกลุ่มเพื่อการสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผลบน HHCs ในสถานะที่เครือข่ายมีหน่วยประมวลผลถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมาก หรือสถานการณ์ที่มีข้อจำกัด ทำให้มีหน่วยประมวลผลย่อย ๆ ที่ไม่ถูกใช้งาน โดยเรียกการจัดกลุ่มนี้ว่า การจัดกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส สำหรับความถูกต้องของการสื่อสารจะถูกทดสอบกับการสื่อสารแบบ ATAPE ระหว่าง k ต้นทาง จนถึง k ปลายทาง ตามลำดับ

คำสำคัญ: การรวมกลุ่มคิวบ์ย่อยแบบไขว้, การหาเส้นทางการสื่อสารแบบขนานที่สั้นที่สุด, กลุ่มของคิวบ์แบบไขว้, การแลกเปลี่ยนแบบเพอร์ซันนัลไลซ์ ออล-ทู-ออล, เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น

Abstract

Due to higher scalability and lower cost compared with normal Hypercube systems (HCs), Hierarchical Hypercube system (HHCs) is one of the popular models for high performance computing machines. However, edges in HHCs are less than those in HCs and communications between processors in HHCs are more complex, which

can cause possible data collisions in parallel computing. Thus, if these issues can be solved, the performance of HHCs will be enhanced and HHCs can be implemented for a multiprocessor system on a chip of embedded systems which supports parallel computing such as All-to-All Personalized Exchange (ATAPE). Nevertheless, in the case of a network with many processors being used or in critical fragments, some processors in the network are not deployed and can be regrouped to do tasks. To solve critical fragments of systems, this paper proposes an extra-GCS combination. As for the validation, the proposed grouping method was verified using ATAPE communication between k sources and k destinations, respectively.

Keywords: Grouping of cross sub-cube (GCS), Parallel shortest-path routing, Grouping of cross dual-cubes (GCD), All-to-all personalized exchange (ATAPE), Hierarchical hypercube networks (HHCs)

1. บทนำ

ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับเครือข่ายการเชื่อมต่อระหว่างหน่วยประมวลผล (Interconnection Network) มีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาเครือข่ายการประมวลผลแบบขนาน (Parallel Computing System) ซึ่งเครือข่ายการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพจะทำให้การสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผล (Processors Elements) มีความรวดเร็วในการส่งข้อมูล และมีความทนทานต่อความผิดพลาด (Fault Tolerance) ดังนั้นการออกแบบเครือข่ายเหล่านี้ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษ คือ โครงสร้างของระบบ (System Topology) เนื่องจากโครงสร้างของระบบจะมีอิทธิพลต่อราคา (Cost) และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

เครือข่ายการเชื่อมต่อมีสองประเภท ประกอบด้วย เครือข่ายการเชื่อมต่อแบบสถิต (Static Interconnection Network) และเครือข่ายการเชื่อมต่อแบบพลวัต (Dynamic Interconnection Network) โดยที่เครือข่ายการเชื่อมต่อแบบสถิต จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ หรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นระบบฝังตัว (Embedded System) ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ประมวลผลกับการประมวลผลเฉพาะทาง เช่น การนำระบบฝังตัวมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบติดตามอากาศยาน [1] ที่ต้องการประมวลผลข้อมูลในปริมาณมาก ๆ และจำเป็นต้องประมวลผลพร้อมกันในเวลาเดียวกัน จะทำให้ระบบติดตามอากาศยานประมวลผลได้เร็วขึ้น เนื่องจากระบบฝังตัวเป็นระบบที่ถูกออกแบบมาเฉพาะทาง เพื่อใช้สำหรับงานที่เฉพาะเจาะจง ด้วยเหตุนี้เครือข่ายการเชื่อมต่อแบบสถิต จึงเป็นเครือข่ายที่มีราคาถูกกว่าการเชื่อมต่อแบบพลวัตที่จะมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของการติดต่อสื่อสารได้ ในอดีตที่ผ่านมาเครือข่ายการเชื่อมต่อแบบสถิตได้ถูกเสนอขึ้นพร้อมกับการคิดค้นขั้นตอนวิธีการสื่อสารอย่างมากมาย [2,3,4,5,6,7,8] ซึ่งหนึ่งในเครือข่ายการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมมากที่สุด คือ เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์ (Hypercube Systems : HCs) [9] เนื่องจากเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เช่น มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ที่ต่ำ มีประสิทธิภาพในการสื่อสารที่สูง และมีความสมมาตร (Symmetry) แต่ในการสร้างระบบที่ต้องปรับขยายขนาดเพิ่มได้ตามยุคสมัย โดยเฉพาะยุคที่มีข้อมูลมากมายมหาศาล จะพบว่า ข้อเสียของเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์ คือ ขาดความเหมาะสมในการขยายขนาด เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มขนาดของเครือข่ายหรือเพิ่มจำนวนหน่วยประมวลผลให้มากขึ้น เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์จะมีสัดส่วนด้านราคาที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งราคานั้นสามารถวัดได้จากจำนวนเส้นเชื่อมและหน่วยประมวลผลที่มีมากขึ้น

ด้วยเหตุนี้ จึงมีนักวิจัยเสนอเครือข่ายที่มีความยืดหยุ่นในการขยายขนาด เพื่อรองรับการประมวลผลที่ต้องใช้หน่วยประมวลผลที่เพิ่มมากขึ้น แต่มีราคาถูกกว่าเนื่องจากมีจำนวนเส้นเชื่อมระหว่างหน่วยประมวลผลลดลง เครือข่ายนั้น คือ เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น (Hierarchical Hypercube Networks : HHCs) ที่มีจำนวนหน่วยประมวลผลจำนวน $N = 2^n$ เมื่อ $n = 2^m + m$ และ $m \geq 2$ [10] นอกจากจะมีความยืดหยุ่นแล้วเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้นยังคงคุณสมบัติเด่น ๆ ของเครือข่าย

ไฮเปอร์คิวบ์ไว้อย่างครบถ้วน เช่น มีความสมมาตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และ โหนดคิริที่เหมาะสม ถึงแม้จะคงคุณสมบัติเด่นของเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์ไว้มาก แต่เครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้นก็ยังมีความยืดหยุ่นด้านการหาเส้นทาง (Routing Paths) เพื่อทำการสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผล เนื่องจากการลดจำนวนเส้นเชื่อมระหว่างหน่วยประมวลผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเกิดปัญหาบ่อยในกรณีที่มีการสื่อสารพร้อมกันแบบขนาน ดังนั้นหนึ่งในงานวิจัยบนเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น ก็คือ การจัดกลุ่มและเส้นทางสำหรับการสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผล หรือโหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการประมวลผลแบบขนาน

ในปี พ.ศ. 2550 ได้มีนักวิจัยคิดค้นการสื่อสารแบบขนานบนเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น [11] โดยเริ่มส่งจาก 1 ต้นทาง (Source) ไปยัง k ปลายทาง (Destination) แต่ยังมีข้อด้อยตรงที่ต้นทางต้องเริ่มที่โหนดลำดับที่ 0 หรือโหนดแรกของ HHCs เท่านั้น ต่อมาได้มีการคิดค้นการส่งข้อมูลแบบกระจาย (Broadcasting) ในปี พ.ศ. 2554 [12] แต่การส่งข้อมูลนั้นยังไม่ใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2564 ได้มีการเสนอการแบ่งกลุ่มของหน่วยประมวลผลที่เรียกว่า คู่อัลคิวบ์แบบไขว้ (Grouping of Cross Dual-cube : GCD) [13] จำนวน 2^{m+1} หน่วยประมวลผล เพื่อการสื่อสารแบบ ATAPE โดยจะส่งข้อความแตกต่างกัน k ข้อความไปยังหน่วยประมวลผลอื่นๆทั้งหมดในระบบ ขั้นตอนวิธีนี้ได้ทำการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางอย่างถูกต้อง และเส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Paths) ล่าสุดในปี 2565 ได้มีนักวิจัยคิดค้นการรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผล ที่เรียกว่าการรวมกลุ่มคิวบ์ย่อยแบบไขว้ (Grouping of Cross Sub-cube : GCS) [14] โดยเป็นการรวมกลุ่มเพื่อการสื่อสารแบบ ATAPE เช่นกัน งานวิจัยนี้สามารถเพิ่มจำนวนการรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลได้มากขึ้น (จำนวน $k \geq 2^{m+2}$) แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่เครือข่ายมีหน่วยประมวลผลถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากหรือภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด จะทำให้มีกลุ่มของหน่วยประมวลผลย่อย ๆ กระจัดกระจาย ที่ไม่ได้ถูกใช้งาน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถใช้ประโยชน์จากหน่วยประมวลผลเหล่านี้ได้เต็มที่

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นไปที่การรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด ที่เรียกว่าการจัดกลุ่มคิวบ์ย่อยแบบพิเศษ หรือแบบเอ็กตรา-จีซีเอส (Extra-GCS) โดยมีจำนวนของหน่วยประมวลผลขนาด $k \geq 2^{m+1}$ และสามารถประยุกต์ใช้ในสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบขนาน ATAPE โดยไม่มีการขัดแย้งกันระหว่างสื่อสาร

2. ขอบเขตงานวิจัย

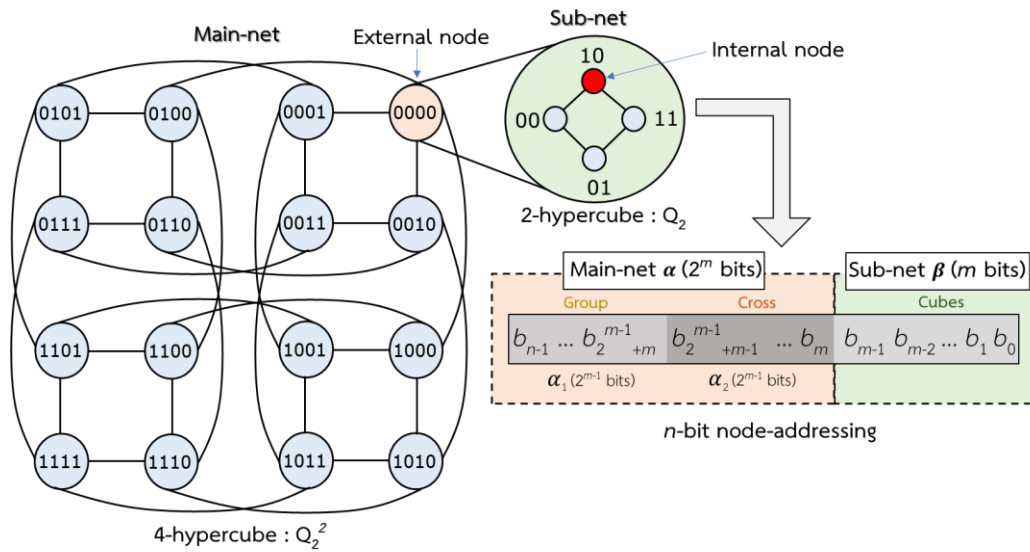
เพื่อจัดกลุ่มของหน่วยประมวลผลบน HHCs ที่รองรับการประมวลผลแบบขนาน ATAPE โดยการจัดกลุ่มนั้นสามารถรองรับความต้องการใช้หน่วยประมวลผลภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด หรือสถานะที่หน่วยประมวลผลในระบบถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากได้

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เครือข่ายการเชื่อมต่อไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น (Hierarchical Hypercube Interconnection Network)

เครือข่ายการเชื่อมต่อไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น [10] จะมีโครงสร้างเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกสามารถถูกสร้างโดยการนำเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบปกติ (2^m -Hypercube : Q_2^m) มาเป็นโครงสร้างพื้นฐาน และถูกเรียกว่าเครือข่ายหลัก (Main-net) แต่ละโหนด (หรือหน่วยประมวลผล) ในเครือข่ายหลักจะเรียกว่า โหนดชั้นนอก (External Node : α) หลังจากนั้นทำการแทนที่แต่ละโหนด ในเครือข่ายหลักด้วยไฮเปอร์คิวบ์แบบปกติ (m -Hypercube : Q_m) ที่มีขนาดเล็กกว่าอีกครั้งหนึ่ง และเรียกว่าเครือข่ายย่อย หรือคิวบ์ย่อย (Sub-net) และเรียกโหนดในคิวบ์ย่อยว่า โหนดชั้นใน (Internal Node : β) ดังนั้นจำนวนของหน่วยประมวลผลบนเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์แบบชั้น (n -HHCs) จะมีทั้งหมด $N = 2^n$ เมื่อ $n = 2^m + m$ และ $m \geq 2$ ซึ่งแต่ละโหนดสามารถถูกแทนด้วย n -บิต (เลขฐาน 2) ที่ไม่ซ้ำกัน ประกอบด้วย 2^m บิตแรกเป็นของโหนดชั้นนอก และ m บิตหลังเป็นของโหนดชั้นใน ดังแสดงในรูปที่ 1

สำหรับตัวอย่างการอ้างถึงโหนด เช่น ถ้าโหนดชั้นนอก หรือ $\alpha = 0000$ และมีโหนดชั้นใน หรือ $\beta = 01$ นั้น หมายถึง โหนดหมายเลข $0000, 01$ (เลขฐาน 2) = โหนดที่ 1 (เลขฐาน 10) (ดูรูปที่ 1 โหนดสีแดง) หรือ โหนดที่มี $\alpha = 0110$ และมี $\beta = 11$ นั้น หมายถึง โหนดหมายเลข $0110, 11 =$ โหนดที่ 27



รูปที่ 1 6-HHCs เมื่อ $m = 2$ ขนาด 64 หน่วยประมวลผล และการระบุโหนดที่ระดับบิต

3.2 การแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบเพอร์ซันนัลไลซ์ ออล-ทู-ออล (All-to-All Personalized Exchange: ATAPE)

ATAPE คือ หนึ่งในวิธีการสื่อสารในระบบคอมพิวเตอร์แบบขนานและแบบกระจาย (Parallel and Distributed Computers) ที่มีประสิทธิภาพรูปแบบหนึ่ง และถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การกระจายข้อมูลแบบ ออล-ทู-ออล (All-to-all Broadcasting) การทรานสโพสิตริกซ์ (Matrix Transposition) [15] และการแปลงฟูเรียร์ หรือ ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มของสัญญาณ (Fast Fourier Transformation) ลักษณะของการสื่อสารแบบ ATAPE คือ การที่ทุกๆ โหนด (จำนวน k โหนด) ทำการส่งข้อความที่แตกต่างกันไปยังโหนดอื่น ๆ ในเครือข่ายทั้งหมด เป็นจำนวน k รอบ (ทำซ้ำ k รอบ) ซึ่งจะใช้ฟังก์ชันเอ็กซลิวซีฟออ์ (XOR-Operation: $\oplus$) [16] ในการสร้างตารางลาติน (Latin Square) เพื่อจัดการส่งข้อมูลจากต้นทาง S (Source) ไปยังปลายทาง D (Destination) ที่ถูกควบคุมด้วยควบคุม C (Control Units) ดังสมการที่ 1 และตัวอย่างตารางลาตินที่ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลลำดับที่ 0 - 7 แสดงในรูปที่ 2 สำหรับการอ่านตาราง เช่น ในรอบที่ $C_i = 4$ เมื่อ $0 \leq i \leq k - 1$ จะมีการส่งข้อมูลจากต้นทาง $S = 3$ ไปยังปลายทาง $D = 7$ เป็นต้น

$$D = S \oplus C \quad (1)$$

เมื่อ D = หน่วยประมวลผลปลายทาง
 S = หน่วยประมวลผลต้นทาง
 และ C = ตัวควบคุม

S: 0 1 2 3 4 5 6 7		C: 0 1 2 3 4 5 6 7
0 1 2 3 4 5 6 7		0
1 0 3 2 5 4 7 6		1
2 3 0 1 6 7 4 5		2
3 2 1 0 7 6 5 4		3
4 5 6 7 0 1 2 3		4
5 4 7 6 1 0 3 2		5
6 7 4 5 2 3 0 1		6
7 6 5 4 3 2 1 0		7

Latin Square

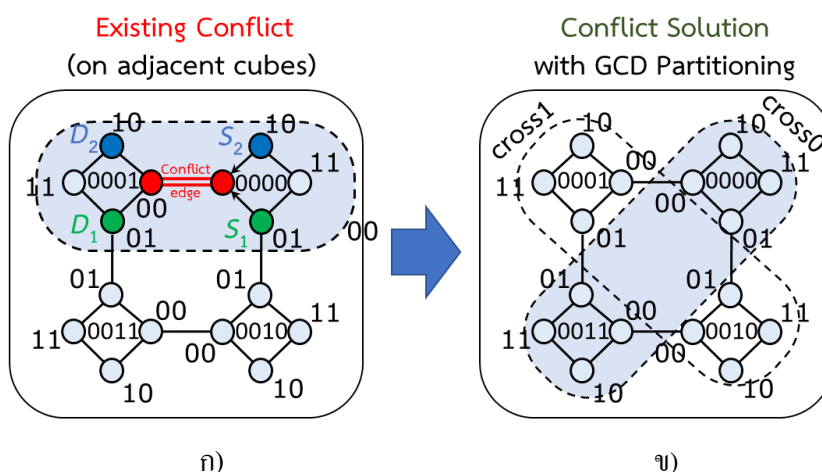
รูปที่ 2 ตารางลาติน ที่เก็บค่าของต้นทาง S และปลายทาง D ในแต่ละรอบตัวควบคุม C

3.3 การจัดกลุ่มของหน่วยประมวลผล และหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบน HHCs

เนื่องจากจุดเด่นของ HHCs คือ เป็นเครือข่ายที่เหมาะสมสำหรับการขยายขนาดและราคาถูก แต่ก็ยังมีจุดด้อย คือ ความซับซ้อนด้านการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหน่วยประมวลผล เนื่องจากมีจำนวนเส้นเชื่อมที่ลดลงเมื่อเทียบกับเครือข่ายไฮเปอร์คิวบ์ ในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยเสนอวิธีการสื่อสารบน HHCs เป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละขั้นตอนวิธีก็จะแตกต่างกันไปตามแต่ละจุดประสงค์ของแต่ละงานวิจัย ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2550 Wu และคณะ [11] สร้างขั้นตอนวิธีหาเส้นทาง $k \leq m + 1$ เส้นทางจากหนึ่งต้นทาง ไปยังหนึ่งปลายทาง ซึ่งได้เสนอวิธีการหาเส้นทางด้านนอก (External Edge Sequence) บน Main-net ซึ่งมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆต่อไป

ในปีพ.ศ. 2554 Bossard และคณะ [12] ได้เสนอวิธีที่เรียกว่าการกระจายไปสู่โหนดย่อย (Subset Broadcasting) ซึ่งก็คือ การหาเส้นทางจำนวน $k \leq m+1$ เส้นทางจากต้นทาง S ไปยังหลายปลายทาง D_i โดยที่ $1 \leq i \leq k$ และ ในปีเดียวกันนี้ Bossard และคณะ [17] ได้เสนอการหาเส้นทางจากต้นทาง S_i ไปยังปลายทาง D_i โดยแต่ละเส้นทางถูกคำนวณภายในเวลา $O(2^m)$ แต่ข้อด้อย คือ เส้นทางที่ได้อาจไม่ใช่เส้นทางที่สั้นที่สุด

ในปีพ.ศ. 2564 [13] ได้มีการคิดค้นทางจัดกลุ่มของคิวบ์แบบไขว้ (Grouping of Cross Dual-cube : GCD) ซึ่งรองรับการจัดกลุ่มของหน่วยประมวลผล $k = 2^{m+1}$ โดยการจัดกลุ่มนั้นใช้เพื่อการสื่อสารแบบขนาน ATAPE และเส้นทางที่ได้จากการสื่อสารเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ลักษณะของการจัดกลุ่มแบบ GCD แสดงดังรูปที่ 3 ข)



รูปที่ 3 ตัวอย่างการแบ่งกลุ่ม ก) การชนกันระหว่างสื่อสารสำหรับการจัดกลุ่มแบบคิวบ์ติดกัน
ข) การแก้ไขการชนกันโดยใช้การแบ่งกลุ่มแบบ GCD

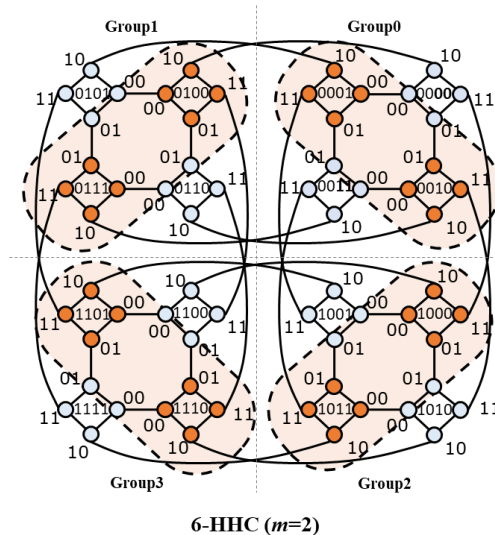
รูปที่ 3 ก) แสดงการจัดกลุ่มแบบคิวบ์ติดกัน (Adjacent Cubes) และ ข) การแบ่งกลุ่มแบบ GCD สังเกตว่า การจัดกลุ่มแบบ Adjacent Cubes จะไม่สามารถสื่อสารแบบ ATAPE ได้ เนื่องจากมีการชนกันในระหว่างการส่งข้อมูลของสองงาน (Task) งานหนึ่งจากต้นทาง S_1 ไปยังปลายทาง D_1 และงานที่สอง จากต้นทาง S_2 ไปยังปลายทาง D_2 ในตำแหน่งเส้นเชื่อม (Edge) $e = (u, v)$ เมื่อ $u = 0000,00$ และ $v = 0001,00$ ดังรูป 2.3 ก) ดังนั้นงานวิจัย [13] จึงเสนอการจัดกลุ่มแบบ GCD มาเพื่อแก้ปัญหการชนกัน โดยจะไปใช้เส้นทางที่สมมาตรกัน (Symmetric Path) และยังได้เสนอการหาเส้นทางที่สมมาตรระดับบิต โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า “การจัดเรียงบิตไปข้างหน้าแบบวนรอบ” (Forward Reordering Bits) และ “การจัดเรียงบิตไปข้างหลังแบบวนรอบ” (Backward Reordering Bits) เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากหน่วยประมวลผลในเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 1

ล่าสุดในปีพ.ศ. 2565 [14] ได้มีการเสนอวิธีการจัดกลุ่มของหน่วยประมวลผลที่ได้จำนวนมากกว่า คือ $2^{m+2} \leq k \leq 2^M$ เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$ เช่น ถ้า $m = 2$ โดยขั้นตอนการจัดกลุ่มจากงานวิจัยนี้จะได้อายุประมวลผลมากที่สุดทั้งหมดถึง 32 หน่วยประมวลผล หรือครึ่งหนึ่งของจำนวนหน่วยประมวลผลทั้งหมดบน 6-HHCs โดยเรียกวิธีการนี้ว่า “การรวมกลุ่มคิวบ์ย่อยแบบไขว้” (Grouping of Cross Sub-cube : GCS) โดยจะทำการหาบิตของเครือข่ายหลักก่อนเป็นอันดับแรก และทำการหาควอลคิวบ์โหนด (Cross) เป็นลำดับต่อไป การใช้วิธีการแบ่งกลุ่มแบบ GCS พร้อมกับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีที่ 1 จะทำให้สามารถใช้งานหน่วยประมวลผลทั้งหมดในเครือข่ายได้เต็มประสิทธิภาพ 100%

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสำหรับการแบ่งกลุ่มแบบ GCS บน 6-HHCs ($N = 64, m = 2$) จำนวน 32 หน่วยประมวลผล ประกอบด้วย Main-net = $\{(0001,0010), (0100,0111), (1000,1011), (0001,0010)\}$ หรือประกอบด้วยหน่วยประมวลผลในรูปตัวเลขฐาน 10 ดังต่อไปนี้ $\{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 44, 45, 46, 47, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59\}$

ขั้นตอนวิธีที่ 1: การหาเส้นทางแบบขนานเพื่อสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผล [13]

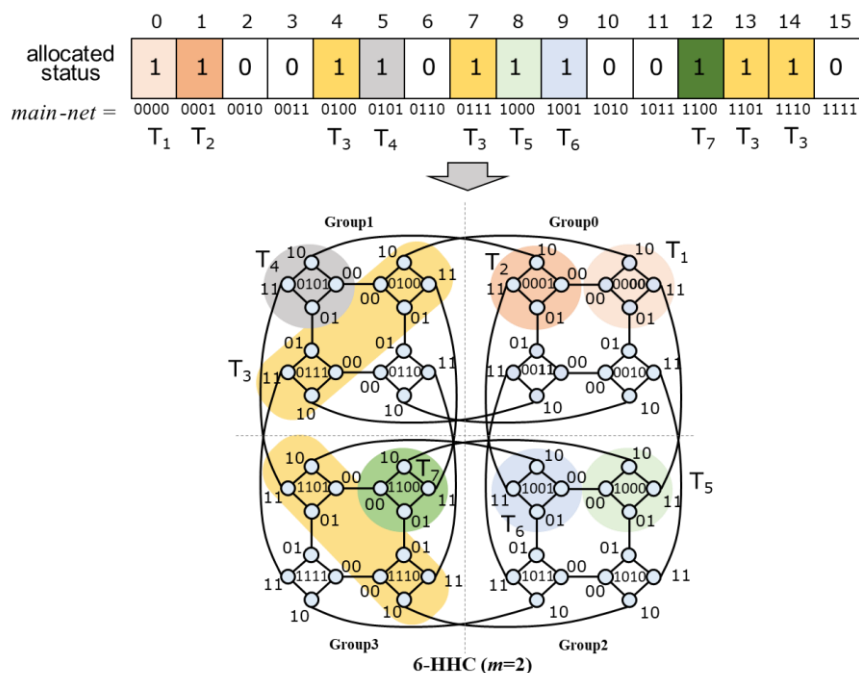
<i>GetParallelSPathHHC</i> 1. $P = \emptyset; \mu = \text{External edge sequence}$ 2. <i>if</i> ($\alpha_s = \alpha_p$) <i>then</i> 3. set P_{in} (HC internal-path routing); 4. <i>else</i> ($\alpha_s \neq \alpha_p$) 5. <i>if</i> ($\beta_s \in \mu$) <i>then</i> $P = P \cup \{ \beta_s, dSPordering(\mu - \{ \beta_s \}) \};$ 6. <i>else</i> $P = P \cup \{ dSPordering(\mu) \};$ 7. <i>return</i> $P;$	
<i>dSPordering</i>(μ) // F: Forward 1. $temp = \beta_s; r' = r;$ 2. $d = (\text{next index of } \beta_s \text{ in } \mu) \% r;$ 3. <i>while</i> ($(p) < r$) <i>do</i> 4. <i>for</i> ($i = 0; i < r'; i++$) <i>do</i> 5. $id = (i + d) \% r';$ 6. { find $\mu[id]$ 7. that is closest to $temp;$} 8. <i>end for</i> 9. <i>end while</i> 10. <i>return</i> p	<i>dSPordering</i>(μ) // B: Backward 1. $temp = \beta_s; r' = r;$ 2. $d = (\text{back index of } \beta_s \text{ in } \mu+r) \% r;$ 3. <i>while</i> ($(p) < r$) <i>do</i> 4. <i>for</i> ($i = 0; i < r'; i++$) <i>do</i> 5. $id = (d - i + r') \% r';$ 6. { find $\mu[id]$ 7. that is closest to $temp;$} 8. <i>end for</i> 9. <i>end while</i> 10. <i>return</i> p



รูปที่ 4 ตัวอย่างการแบ่งกลุ่มของหน่วยประมวลผลแบบ GCS บน 6-HHCs ($N = 64, m = 2$)
จำนวน 32 หน่วยประมวลผล

4. การดำเนินงานวิจัย

สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด คือ สถานการณ์ที่มีกลุ่มของหน่วยประมวลผลกำลังถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในระบบ โดยสามารถตรวจสอบจากสถานะการจัดสรร (Allocated Status) ถ้าเก็บค่า 0 = โหนดว่าง ถ้าเก็บค่า 1 = โหนดไม่ว่าง ซึ่งในสถานการณ์ดังกล่าวอาจจะไม่สามารถจัดสรรหน่วยประมวลผลให้กับงาน (Task) ใหม่ที่มีขนาดใหญ่ได้ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 5 แสดง 6-HHCs ($N = 64, m = 2$) ที่มีงาน 7 งาน ที่กำลังใช้หน่วยประมวลผลจำนวน 40 หน่วยประมวลผลอยู่ ประกอบด้วยงาน T_1, T_2, T_4, T_5, T_6 และ T_7 จำนวนงานละ 4 หน่วยประมวลผล อยู่บนโหนดชั้นนอก 0000, 0001, 0101, 1000, 1001 และ 1100 ตามลำดับ และมีงาน T_3 จำนวน 16 หน่วยประมวลผล อยู่บนโหนดชั้นนอกแบบ Cross-node (0100, 0111, 1101, 1110)



รูปที่ 5 การจัดสรรงานลง 6-HHCs จำนวน 7 งาน

สังเกตว่า งานที่มีอยู่บนเครือข่ายจะไม่สามารถใช้ขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มแบบ GCD หรือ GCS ในการรองรับงานใหม่ที่มีขนาดใหญ่ได้ ($k \geq 2^{m+1}$) เช่น ในกรณีที่มีงานใหม่ (Incoming Tasks) ที่ต้องการหน่วยประมวลผล ATAPE จำนวน 16 หน่วยประมวลผลจะไม่สามารถจัดสรรลงในเครือข่าย ณ เวลาปัจจุบันได้ ดังนั้น การรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส จึงถูกเสนอขึ้นมาเพื่อรองรับสถานการณ์นี้

งานวิจัยนี้จะทำการเลือกหนึ่งโหนดชั้นนอก (External Node) บนแต่ละกลุ่มของโหนดชั้นนอก (External Node Grouping : Group) มารวมกันเป็นเอ็กทรา-จีซีเอส ที่สามารถรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลจำนวน $k = 2^{m+1}$ ถึง 2^M โหนด เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$ โดยที่ Group_g จะหาได้จาก 2 บิตแรกของโหนดชั้นนอกนับจากซ้ายมือ เมื่อ $0 \leq g \leq 2^m - 1$ เมื่อ $w = 2^{m-1}$ เช่น โหนด 0110 บน 6-HHCs มี 2 บิตแรก คือ 01 นั้นแสดงให้เห็นว่าโหนด 0110 จะอยู่ใน Group_1 เป็นต้น

ขั้นตอนวิธีสำหรับการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส เริ่มโดยการเลือกโหนดแรกที่ว่าง (Available) เรียกว่า โหนดอินพุต (Input Node) โดยกำหนดให้ โหนดอินพุตของโหนดชั้นนอกแทนด้วย $A = \alpha_{1A}\alpha_{2A}$ และ โหนดผลลัพธ์ (Output) ของโหนดชั้นนอก แทนด้วย $D = \alpha_{1D}\alpha_{2D}$ โดยที่ โหนดชั้นนอก D จะต้องเป็นโหนดที่อยู่ใน Group ที่อยู่ติดกันกับโหนดชั้นนอก A (Adjacent Group) และขั้นตอนต่อมาจะทำการหาครอส (Cross) ของโหนดชั้นนอก A ดังนั้น กลุ่มที่ติดกันกลุ่มที่ i (ของกลุ่ม $\alpha_{1A} = \alpha_{1A} \oplus 2^a$ เมื่อ $0 \leq a \leq w-1$ และ D จะสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2

$$\begin{aligned} \text{Group } \alpha_{1D} \text{ (ของ } D) &= i \\ \text{Cross } \alpha_{2D} \text{ (ของ } D) &= \overline{\alpha_{2A} \oplus i} \end{aligned} \quad (2)$$

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส สำหรับหน่วยประมวลผลขนาด $k = 2^{m+1} = 8$ โหนด บน 6-HHCs โดยกำหนดให้ โหนดอินพุต A ประกอบด้วยสี่โหนดดังนี้ 0000, 0001, 0010 และ 0011 สังเกตว่าผลลัพธ์ของโหนดชั้นนอก D ของแต่ละโหนดอินพุต A จะประกอบด้วยสองโหนด คือ D_1 และ D_2 เนื่องจากกลุ่มที่อยู่ติดกันกับกลุ่มของโหนด A ประกอบด้วยสองกลุ่ม เช่น ถ้าโหนดข้อมูลเข้า $A = \alpha_{1A}\alpha_{2A} = 0000$ จะได้ว่ามี $i = 1$ และ 2 เมื่อ $i = 1$ (หรือ $\alpha_{1D} = 01$) จะได้ $\alpha_{2D} = \overline{\alpha_{2A} \oplus i} = \overline{00 \oplus 01} = 10$ ดังนั้นจะได้ $D_1 = \alpha_{1D}\alpha_{2D} = 0110$ ซึ่งจะได้การรวมกลุ่มของเอ็กทรา-จีซีเอส จำนวน 8 โหนด คือ (0000, xx) และ (0110, xx) โดยมีจำนวนหน่วยประมวลผลทั้งหมดคือ (0, 1, 2, 3, 24, 25, 26, 27) และในทำนองเดียวกัน ถ้า $i = 2$ (หรือ 10) จะได้ $D_2 = 1001$ และมีการรวมกลุ่มของเอ็กทรา-จีซีเอส จำนวน 8 โหนด คือ 0000, xx และ 1001, xx และตัวอย่างนี้แสดงในรูปที่ 6 ก) และรูปที่ 6 ข) แสดงตัวอย่างเมื่อ $A = 0011$

อย่างไรก็ตามภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด และกรณีที่ต้องการหน่วยประมวลผลจำนวน $k > 2^{m+1}$ ถึง 2^M โหนด เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$ สามารถใช้สมการที่ 2 ร่วมกันกับสมการที่ 3 เพื่อรวมกลุ่ม 4 กลุ่ม (หรือสูงสุด 2^m กลุ่ม) โดยจะใช้เพียงหนึ่งโหนดชั้นนอกต่อหนึ่งกลุ่มเท่านั้น เช่น A, D_1, D_2 และ D_3 เมื่อ $k = 2^{m+2} = 16$ บน 6-HHCs และสามารถหาโหนดชั้นนอกโหนดสุดท้าย (เช่น D_3) ได้จากสมการที่ 3 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Group } \alpha_{1D} \text{ (ของ } D) &= 11 \dots 1 \\ \text{Cross } \alpha_{2D} \text{ (ของ } D) &= \overline{\alpha_{2A}} \end{aligned} \quad (3)$$

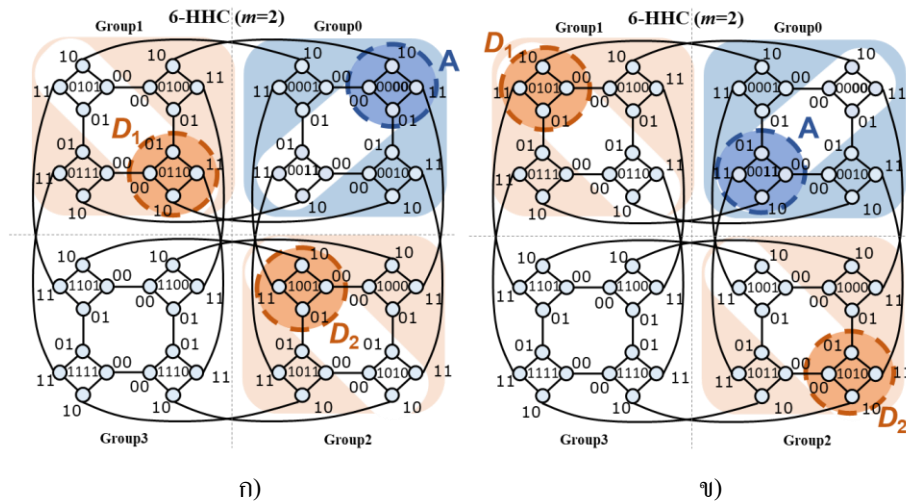
ตัวอย่างเช่น กรณีที่ต้องการหน่วยประมวลผลจำนวน 16 หน่วยประมวลผล โดยมีโหนด $A = 0000$ จะได้ว่า มี $i = 1$ (หรือ 01) และ 2 (หรือ 10) ซึ่งขั้นตอนการหาโหนด D_1 และ D_2 สามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างก่อนหน้า ซึ่งจะได้ว่า $D_1 = 0110$ และ $D_2 = 1001$ สำหรับการหา D_3 จะใช้สมการที่ 3 จะได้ว่า $\alpha_{1D} = 11$ และ $\alpha_{2D} = 00 = 11$ ดังนั้นจะได้ $D_3 = \alpha_{1D} \alpha_{2D} = 1111$ ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 7 ก) และ $A = 0011$ ในรูปที่ 7 ข) หรือตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เอ็กทรา-จีซีเอส สำหรับ $k = 2^{m+1}$ บน 6-HHCs ($m = 2$ และ $A = 0 - 3$)

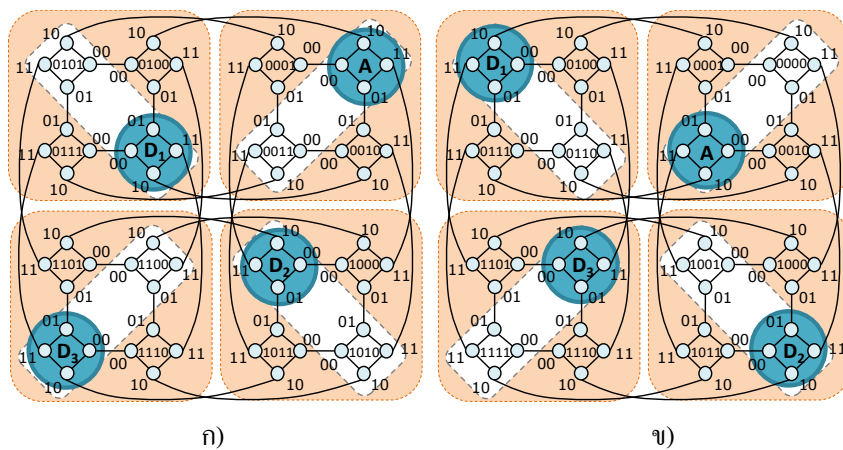
A	α_{1D}	α_{2D}	$D = \alpha_{1D} \alpha_{2D}$	β	$2^{m+1} = 8 \text{ Ps } (4 \times 2)$
0000	01	10	$D_1 = 0110$	00 - 11	<u>0</u> ,1,2,3, <u>24</u> ,25,26,27
0000	10	01	$D_2 = 1001$	00 - 11	<u>0</u> ,1,2,3, <u>36</u> ,37,38,39
0001	01	11	$D_1 = 0111$	00 - 11	<u>4</u> ,5,6,7, <u>28</u> ,29,30,31
0001	10	00	$D_2 = 1000$	00 - 11	<u>4</u> ,5,6,7, <u>32</u> ,33,34,35
0010	01	00	$D_1 = 0100$	00 - 11	<u>8</u> ,9,10,11, <u>16</u> ,17,18,19
0010	10	11	$D_2 = 1011$	00 - 11	<u>8</u> ,9,10,11, <u>44</u> ,45,46,47
0011	01	01	$D_1 = 0101$	00 - 11	<u>12</u> ,13,14,15, <u>20</u> ,21,22,23
0011	10	10	$D_2 = 1010$	00 - 11	<u>12</u> ,13,14,15, <u>40</u> ,41,42,43

ตารางที่ 2 เอ็กทรา-จีซีเอส สำหรับ $k = 2^{m+2}$ บน 6-HHCs ($m = 2$ และ $A = 0 - 3$)

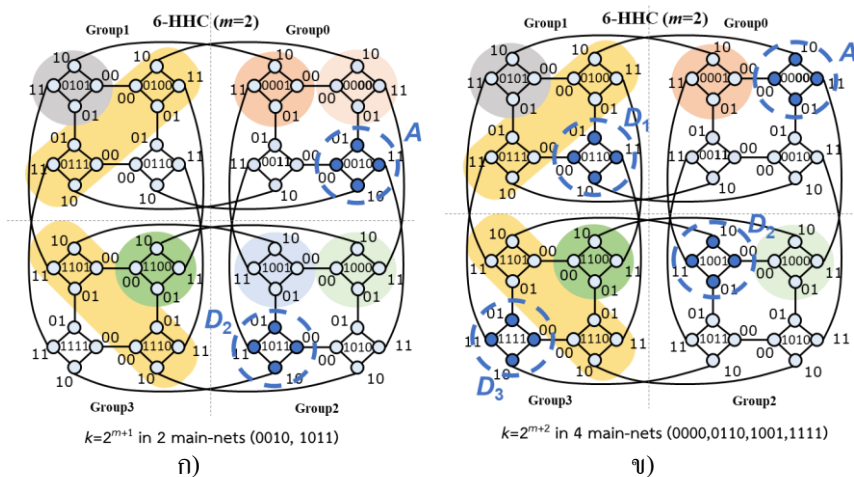
A	α_{1D}	α_{2D}	$D = \alpha_{1D} \alpha_{2D}$	β	$2^{m+1} = 8 \text{ Ps } (4 \times 2)$
0000	00	00	$A = 0000$	00 - 11	0, 1, 2, 3
	01	10	$D_1 = 0110$	00 - 11	24, 25, 26, 27
	10	01	$D_2 = 1001$	00 - 11	36, 37, 38, 39
	11	11	$D_3 = 1111$	00 - 11	60, 61, 62, 63
0001	00	01	$A = 0001$	00 - 11	4, 5, 6, 7
	01	11	$D_1 = 0111$	00 - 11	28, 29, 30, 31
	10	00	$D_2 = 1000$	00 - 11	32, 33, 34, 35
	11	10	$D_3 = 1110$	00 - 11	56, 57, 58, 59
0010	00	10	$A = 0010$	00 - 11	8, 9, 10, 11
	01	00	$D_1 = 0100$	00 - 11	16, 17, 18, 19
	10	11	$D_2 = 1011$	00 - 11	44, 45, 46, 47
	11	01	$D_3 = 1101$	00 - 11	52, 53, 54, 55
0011	00	11	$A = 0011$	00 - 11	12, 13, 14, 15
	01	01	$D_1 = 0101$	00 - 11	20, 21, 22, 23
	10	10	$D_2 = 1010$	00 - 11	40, 41, 42, 43
	11	00	$D_3 = 1100$	00 - 11	48, 49, 50, 51



รูปที่ 6 ตัวอย่างการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส เมื่อ $A = 0000$ ก) และ 0011
ข) เครือข่าย 6-HHCs ($N = 64, m = 2$) ที่มีหน่วยประมวลผลขนาด $k = 2^{m+1}$



รูปที่ 7 ตัวอย่างการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส เมื่อ $A = 0000$ ก) และ 0011
ข) เครือข่าย 6-HHCs ($N = 64, m = 2$) ที่มีหน่วยประมวลผลขนาด $k = 2^{m+2}$



รูปที่ 8 ตัวอย่างการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส ขนาด $k = 2^{m+1}$, $A = 0010$ ก)
และ $k = 2^{m+2}$, $A = 0000$ ข) บน 6-HHCs ($N = 64, m = 2$)

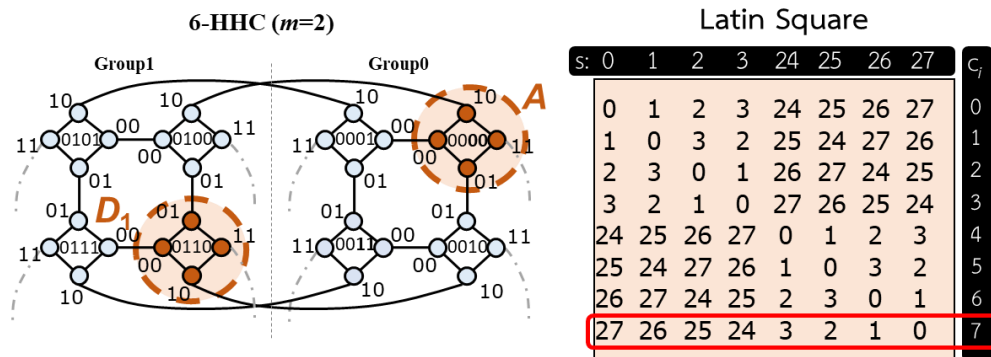
รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างสำหรับการรวมกลุ่มภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัดด้วยเอ็กทรา-จีซีเอส สมมติให้ มีโหนดชั้นนอก (External Node) บน 6-HHCs มีหน่วยประมวลผลว่างอยู่ 6 โหนด หรือ 24 หน่วยประมวลผลจากทั้งหมด 16 โหนดชั้นนอก (ดูรูปที่ 8 ก)) ถ้าระบบต้องการหน่วยประมวลผลขนาด $k=2^{m+1}=8$ หน่วยประมวลผลสำหรับการ ATAPE แต่ไม่สามารถรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลแบบ GCD สำหรับงานที่ต้องการได้ ดังนั้นการจัดสรรกลุ่มของ 8 หน่วยประมวลผลนี้จะต้องใช้การรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส โดยโหนดข้อมูลเข้าโหนดแรก คือ $A = 0010$ และใช้สมการที่ 2 เพื่อหาตัวคูณของ A จะได้ว่า $D_2 = 1011$ (เนื่องจาก $D_1 = 0100$ ไม่ว่าง)

ต่อมาสมมติว่า มีการยกเลิกการจัดสรร (Deallocation) ของบางหน่วยประมวลผลที่เสร็จจากงานที่ได้รับมอบหมาย คือ โหนดที่ 0000, 1001 ดังนั้น จะมี 8 โหนดชั้นนอกที่ว่าง (รูปที่ 8 ข)) และระบบต้องการหน่วยประมวลผลจำนวน $k=2^{m+2}=16$ หน่วยประมวลผล เพื่อรองรับงานที่จะเข้าสู่ระบบมาใหม่ แต่ไม่สามารถรวมหน่วยประมวลผลแบบ GCD [13] หรือ GCS [14] ได้ ดังนั้น เพื่อรองรับงานที่เข้ามาใหม่ จึงต้องใช้วิธีการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส ซึ่งสำหรับ 16 หน่วยประมวลผลที่มี $A = 0000$ จะได้ $D_1 = 0110$, $D_2 = 1001$ และ $D_3 = 1111$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ข)

5. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูล โดยนำวิธีการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบ ATAPE มาทดสอบความถูกต้องสำหรับการส่งข้อมูลจากหน่วยประมวลผลต้นทาง S สู่หน่วยประมวลผลปลายทาง D โดยการทดสอบจะใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาจาวา (JAVA Programming Language) และในการจำลอง HHCs จะมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้ 1) การสื่อสารระหว่าง S และ D จะใช้เวลา 1 สัญญาณนาฬิกา (Clock) และ 2) การใช้เส้นเชื่อมบน HHCs ถ้าเป็นทิศทางตรงกันข้ามจะสามารถใช้เส้นเชื่อมเดียวกันได้

ตัวอย่างการทดลอง จะจำลองทิศทางการสื่อสารของโหนดต้นทาง S ไปยังโหนดปลายทาง D ซึ่งหน่วยประมวลผลทั้งหมดได้จากสมการที่ 2 ประกอบด้วย $A = 0000$ และ $D_1 = 0110$ ดังนั้นจะมีหน่วยประมวลผลทั้งหมด 8 หน่วยประมวลผล (โหนดละ 4 หน่วยประมวลผล) ประกอบด้วย 0000,00 (หรือ 0 ในเลขฐาน 10), 0000,01 (หรือ 1), 0000,10 (หรือ 2), 0000,11 (หรือ 3), 0110,00 (หรือ 24), 0110,01 (หรือ 25), 0110,10 (หรือ 26) และ 0110,11 (หรือ 27) ดังแสดงดังรูปที่ 9 สำหรับรอบการส่งข้อมูล หรือตัวควบคุมรอบจะถูกแทนด้วย C_i โดยจะมีทั้งหมด 8 รอบ (0 - 7) และการรับส่งข้อมูลจะเริ่มจากโหนดต้นทางที่จะถูกแทนด้วย $S = 0, 1, 2, 3, 24, 25, 26, 27$ และโหนดปลายทางจะถูกกำหนดไว้ในตารางลาติน (Latin Square Table)



รูปที่ 9 ตัวอย่างตารางลาตินขนาด 8×8 เพื่อการสื่อสารแบบ ATAPE ของการแบ่งกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส

บน 6-HHCs ($N=64$, $m=2$) เมื่อ $A = 0000$, และ $D = 0110$

สำหรับการหาเส้นทางการสื่อสาร (Routing Paths) จะใช้ขั้นตอนวิธีที่ 1 ซึ่งถูกเสนอในงานวิจัย [13] และผลของเส้นทางการสื่อสารของตัวอย่างนี้ $A = 0000$ และ $D_1 = 0110$ ถูกแสดงในตารางที่ 3 โดยจะแสดงเฉพาะตัวควบคุมที่ 7 ($C = 7$) เพื่อการง่ายในการอธิบายและแสดงผล

ตารางที่ 3 แสดงเส้นทางการสื่อสารระหว่าง S และ D_1 ผ่าน 6 สัญญาณนาฬิกา (Clock) และ $C = 7$

Clock		1		2		3		4		5		6	
C=7	S = 0:0000,00	→	0000,01	→	0010,01	→	0010,00	→	0010,10	→	0110,10	→	27:0110,11 = D
	S = 1:0000,01	→	0010,01	→	0010,00	→	0010,10	→	26:0110,10 = D				
	S = 2:0000,10	→	0100,10	→	0100,11	→	0100,01	→	25:0110,01 = D				
	S = 3:0000,11	→	0000,10	→	0100,10	→	0100,11	→	0100,01	→	0110,01	→	24:0110,00 = D
	S = 24:0110,00	→	0110,01	→	0100,01	→	0100,00	→	0100,10	→	0000,10	→	3:0000,11 = D
	S = 25:0110,01	→	0100,01	→	0100,00	→	0100,10	→	2:0000,10 = D				
	S = 26:0110,10	→	0010,10	→	0010,11	→	0010,01	→	1:0000,01 = D				
	S = 27:0110,11	→	0110,10	→	0010,10	→	0010,11	→	0010,01	→	0000,01	→	0:0000,00 = D

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส สามารถจัดกลุ่มการสื่อสารแบบ ATAPE ระหว่างหน่วยประมวลผลได้โดยไม่มีการชนกันของข้อมูล สามารถสังเกตได้จากการไม่มีโหนดคั่นทาง และปลายทางซ้ำกันในช่วงของแต่ละสัญญาณนาฬิกา (Clock) นอกจากนั้นเส้นทางที่ได้ยังคงเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการสื่อสารแบบขนาน

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการแบ่งกลุ่ม จะทำการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4 โดยจะเปรียบเทียบกับการแบ่งกลุ่มแบบ GCD การแบ่งกลุ่มแบบ GCS และการแบ่งกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส ซึ่งถูกเสนอในงานวิจัยนี้ ตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถรองรับคุณสมบัติทั้งหมด โดยเฉพาะความสามารถในการใช้หน่วยประมวลผลภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัด หรือสถานะที่หน่วยประมวลผลในระบบถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากได้

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี

Features	GCD [13]	GCS [14]	Extra-GCS
Routing (Arbitrary S)	✓	✓	✓
Routing-conflict Solution	✓	✓	✓
Group Partitioning	✓	✓	✓
Maximum Task Sizes	$k \leq 2^{m+1}$	$2^{m+2} \leq k \leq 2^M$ เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$	$2^{m+1} \leq k \leq 2^M$ เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$
Parallel Applications	ATAPE	ATAPE	ATAPE
Critical Situations	-	-	✓

หมายเหตุ เครื่องหมาย ✓ หมายถึง สามารถรองรับคุณสมบัตินั้น ๆ ได้

6. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้เสนอการรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลเพื่อการสื่อสารแบบขนาน บน n -HHCs ที่เรียกว่าการรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส โดยการรวมกลุ่มนั้นถูกเสนอมาเพื่อรองรับในกรณีที่เครือข่ายมีหน่วยประมวลผลถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมาก หรือภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจัดสรรหน่วยประมวลผลสำหรับงานใหม่ที่จะเข้ามาสู่เครือข่ายได้ สำหรับความถูกต้องของการสื่อสารจะถูกตรวจสอบโดยใช้การสื่อสารแบบ ATAPE ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบขนานที่มีประสิทธิภาพชนิดหนึ่ง ผลการทดลองพบว่า การรวมกลุ่มแบบเอ็กทรา-จีซีเอส สามารถรวมกลุ่มของหน่วยประมวลผลขนาด $2^{m+1} \leq k \leq 2^M$ เมื่อ $M = 2^m - 2^{m-1} + m - 1$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อมาทดสอบกับการสื่อสารแบบ ATAPE ก็สามารถส่งข้อมูลจากต้นทาง ถึงปลายทางได้อย่างถูกต้อง และยังคงมีคุณสมบัติของการเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดอยู่ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดกลุ่มที่ถูกเสนอมาก่อนหน้านี้ คือ แบ่งกลุ่มของคิวอัลคิวแบบไขว้ (GCD) และการรวมกลุ่มคิวย่อยแบบไขว้ (GCS) พบว่า การรวมกลุ่มแบบ GCD และ GCS ยังไม่สามารถรองรับการใช้หน่วยประมวลผลภายใต้สถานการณ์ที่มีข้อจำกัดได้

7. ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดสรรหน่วยประมวลผลบน HHCs จำเป็นที่จะต้องมีส่วนขั้นตอนวิธีในการจัดสรรหน่วยประมวลผลที่ทำการรวมหน่วยประมวลผลขนาดเล็กที่สุด เช่น 1 หรือน้อยกว่า 2^{m+1} หน่วยประมวลผล ซึ่งอาจอยู่คนละ Group กัน นำมารวมกลุ่มกันให้สามารถประมวลผลงานที่ต้องการได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ประโยชน์จากหน่วยประมวลผลได้อย่างคุ้มค่าที่สุด

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัญญาวีจน์ สติฉิทรสมบัติ และ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง. (2564). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซลลูลาร์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, 17(1): 60-70.
- [2] Abd-El-Barr, M., & Al-Somani, T.F. (2011). Performance comparison of hierarchical interconnection networks. *IEEE Pacific Rim Conference on Communications*.: 191 – 196.
- [3] Antoine, B., & Keiichi, K. (2011). Set-to-Set Disjoint-path Routing in Perfect Hierarchical Hypercube. *The Fourth International C* Conference on Computer Science and Software Engineering*. : 51-57.
- [4] Cheng-Nan, L. (2014). An efficient construction of one-to-many node-disjoint paths in folded hypercubes. *J.Parallel and Distributed Computing*. vol.74: 2310-2316.
- [5] Cheng-Nan, L. (2017). Optimal Construction of Node-Disjoint Shortest Paths in Folded Hypercubes. *J. Parallel and Distributed Computing*. vol.102: 37-41.
- [6] Chienhua, C., & Dharma, P. A. (1993). dBCube: a new class of hierarchical multiprocessor interconnection networks with area efficient layout. *IEEE Trans. Parallel and Distributed System*. 4(12): 1332-1344.
- [7] Baojun, Q., Feng, S., & Weixing, Ji. (2007). THIN: A New Hierarchical Interconnection Network-on-Chip for SOC. *The 7th international conference on Algorithms and architectures for parallel processing*. : 446-457.
- [8] Ke, Q. (2008). An efficient Disjoint Shortest Paths Routing Algorithm for the Hypercube. *14th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems*. : 43 – 47.
- [9] Yousef, S., & Martin, H.S. (1988). Topological properties of hypercubes. *IEEE Trans. Comput*. 37(7): 867-872.
- [10] Qutaibah, M., & Magdy, B. (1994). The hierarchical hypercube: A new interconnection topology for massively parallel systems. *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*. 5(1): 17-30.
- [11] Ruei, Y.W., Chen, G.H., & Gen, J. (2007). Node-disjoint paths in hierarchical hypercube networks. *Information Sciences*. 117(19): 4200-4207.

- [12] Antoine, B., Keiichi, K., & Shietung, P. (2011). Node-to-set disjoint-path routing in perfect hierarchical hypercubes. *International Conference on Computational Science*. Vol.4: 442-451.
- [13] Nuntipat, P., & Jeeraporn, W. (2021). Shortest-Path Routing for Optimal All-to-All Personalized-Exchange Embedding on Hierarchical Hypercube. *J. Parallel Distrib. Comput.* Vol.150C: 139-154.
- [14] Nuntipat, P., & Jeeraporn, W. (2022). Optimal ATAPE-Task Scheduling on Reconfigurable and Partitionable Hierarchical Hypercube Networks. *Parallel Computing*. Vol.111: 102923.
- [15] Roselin, P., & Jeeraporn, W. (2017). Embedding the optimal all-to-all personalized exchange on multistage interconnection networks⁺. *J. Parallel Distrib. Comput.* 16(88): 1-15.
- [16] Scott, D.S. (1991). Efficient all-to-all communication patterns in hypercube and mesh topologies. *Distributed memory computing conference*. : 398-403.
- [17] Antoine, B., & Keiichi, K. (2013). k – pairwise disjoint paths routing in perfect hierarchical hypercubes. *The J. Supercomputing*. Vol 67: 485-495.

การเตรียมและสมบัติด้านแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสาร

Preparation and Flexural Property of Composite of Carbon Black Reinforced Epoxy Resin

^{1*}ณัฐพล เกษางาม และ ^{2#}วรุฒ ธรรมวิชัย

¹สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

²กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*}Nattapon Kesangam and ^{2#}Warut Thammawichai

¹The Graduate School, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

*nkkesangam@gmail.com, #warut_t@rtaf.mi.th

Received : September 12, 2022

Revised : October 18, 2022

Accepted : December 20, 2022

บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตที่มีอีพ็อกซีเรซินจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก เป็นเนื้อสารมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงศตวรรษที่ 20 เนื่องจากมีความหลากหลายและมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งาน โดยนิยมใช้ร่วมกับสารเสริมแรงในกลุ่มคาร์บอน เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาและวิเคราะห์การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กด้วยเทคนิคอัลตราโซนิค (Couple Ultrasonic) ซึ่งเป็นการประยุกต์การกระจายตัวของอนุภาคโดยการสั่นด้วยเครื่องสั่นแบบอ่าง (Ultrasonic Bath) และเครื่องสั่นแบบโพรบ (Ultrasonic Probe) ในตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน อะซิโตน เอทานอล เมทานอล และเมทิลเอทิลคีโตน และศึกษาสมบัติด้านแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวได้ดีในสารละลาย 4 ชนิด คือ อะซิโตน เอทานอล เมทานอล และเมทิลเอทิลคีโตน แต่อนุภาคคาร์บอนแบล็กจะเริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที มีเพียงอนุภาคคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายเมทานอลเท่านั้นที่รักษาเสถียรภาพได้ดี ไม่กลับมารวมตัวกันอีกครั้ง และไม่ตกตะกอนลงก้นภาชนะแม้เวลาจะผ่านไป 5 วัน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 298.2 นาโนเมตร นอกจากนี้ วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มสมบัติด้านทานแรงดัด โดยเฉพาะความเค้น ณ จุดครากได้ โดยวัสดุอีพ็อกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความเค้น ณ จุดครากถึง 19 % ในขณะที่ค่ามอดูลัสของยังมีค่าคงเดิม

คำสำคัญ: วัสดุคอมโพสิต, คาร์บอนแบล็ก, อีพ็อกซีเรซิน, สมบัติด้านแรงดัด, ความเค้น ณ จุดคราก

Abstract

Composite materials derived from epoxy resin as a thermoplastic are widely used in the 20th century due to their variety and flexibility in applications. It is commonly used in combination with carbon reinforcing to create a new kind of high-strength but lightweight material. The main objective of this research is to study and analyze the preparation of carbon black particles by using a couple of ultrasonic technique, which is particle dispersion through ultrasonic bath and ultrasonic probe in 5 solvent DI water, acetone, ethanol, methanol, and methyl ethyl ketone. And to study the flexural property of composite reinforced carbon black by the universal testing machine. The result found that the carbon black could be dispersed in 4 solvents: acetone, ethanol, methanol, and methyl ethyl ketone. However, it was precipitated after 60 minutes unless the carbon black was in the methanol. The particles were dispersed in the methanol without aggregation or precipitation after 5 days. The particle size of carbon black had an average particle diameter of 298.2 nm. In addition, the composite materials reinforced 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5 wt.% of carbon black increase the flexural properties especially the stress at the yield point. The composite materials reinforced with 0.3 wt.% of carbon black increase the yield stress by 19% while Young's modulus remains unchanged.

Keywords: Composite Material, Carbon Black, Epoxy Resin, Flexural Property, Yield Stress

1. บทนำ

ในช่วงกลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 เป็นช่วงต้นของการประยุกต์และพัฒนาความรู้ทางวัสดุศาสตร์โดยการเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักที่แตกต่างกัน นั่นคือ เนื้อสาร (Matrix) ซึ่งเป็นเฟสของสารที่มีความต่อเนื่องกัน และสารเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งเป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อสาร [1,2, 3] มาใช้ทดแทนวัสดุเดิมที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม และไม้ และในขณะนั้นเป็นช่วงของสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งต้องการวัสดุชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบา จึงมีการใช้ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพัฒนาวัสดุคอมโพสิตขึ้น โดยเริ่มมีการสังเคราะห์วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเรซินยูเรียฟอर्मัลดีไฮด์ พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว และอีพอกซีเรซิน สำหรับผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูง ส่งผลให้ปลายคริสต์วรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบันมีการนำวัสดุคอมโพสิตมาปรับปรุง ประยุกต์ และพัฒนาจนสามารถนำมาใช้งานเป็นเครื่องมือ หรือชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น [4,5]

วัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีเนื้อสารอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ โดยอีพอกซีเรซินซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่มีการพัฒนาจนสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม เริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 และในปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย [6, 7] อาทิเช่น สารเคลือบผิว สารช่วยยึดติด และเนื้อสารของวัสดุคอมโพสิต สำหรับขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องมือและเครื่องจักรในงานวิศวกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์ และชิ้นส่วนอากาศยาน เนื่องจากอีพอกซีเรซินมีความสามารถในการทนทานต่อสารเคมี ความร้อน และความชื้นได้ดี นอกจากนั้น เมื่อนำอีพอกซีเรซินมาขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตจะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเสริมแรงจำนวนมาก จากหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ห่างกันอย่างมีระเบียบ ภายในโมเลกุลของอีพอกซีเรซิน ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่สูง รวมทั้งโครงสร้างโมเลกุลของอีพอกซีเรซินประกอบด้วยวงอะโรมาติก จึงส่งผลให้สายโซ่มีความแข็งแรงมากขึ้น

สารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตทำหน้าที่ในการกระจายแรงไปยังเนื้อสาร เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำ โดยวัสดุในกลุ่มคาร์บอน เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง เนื่องจากสามารถยึดติดกับเนื้อสารได้ดี มีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black) เป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถใช้สารเสริมแรงในรูปแบบอนุภาค (Particles) ให้กับวัสดุคอมโพสิต [8] โดยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก เกิดจากการเรียงซ้อนทับกันของแผ่นกราฟีน (Graphene) ขนาดเล็กหลายชั้นอย่างเป็นระเบียบ ยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นด้วยแรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) เกิดเป็นก้อนคาร์บอนแบล็กขึ้น [9,10,11] โดยทั่วไปคาร์บอนแบล็กมักใช้เสริมแรง ให้กับยางวัลคาไนซ์ การเคลือบผิว พลาสติก [12,13] และปัจจุบันคาร์บอนแบล็กมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม พอลิเมอร์อื่น ๆ [14] Khalil และคณะ [15] สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเรซินเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยสังเคราะห์คาร์บอนแบล็กจากไม้ไผ่ เส้นใยมะพร้าว และปาล์มน้ำมัน ผลการทดลองพบว่า วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ยังคงมีความแข็งแรง แต่มีคุณสมบัติการยึดหยุ่นที่ดีขึ้น โดยคาร์บอนแบล็กที่สังเคราะห์ได้สามารถกระจายแรงไปยังเนื้อวัสดุ จนทำให้สามารถรับแรงกระทำได้ดีขึ้น Kuzhir และคณะ [16] นำคาร์บอนแบล็กมาช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตที่มีเนื้อสารเป็นอีพอกซี โดยผลการทดสอบพบว่า คาร์บอนแบล็กสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตได้ Yue และคณะ [17] ได้พัฒนาวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กชนิดโฟม โดยสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกล ให้ดีกว่าวัสดุเดิมที่ไม่มีการเติมคาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ Tanusree Bera และคณะ [18] ได้สังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต ที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพอกซีเรซินเป็นเนื้อสารในอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน และทดสอบสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัด และสมบัติด้านแรงกระแทก ผลการทดลองพบว่า วัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก มีสมบัติด้านแรงดึง สมบัติด้านแรงดัด และสมบัติด้านแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อเติมคาร์บอนแบล็ก 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ในการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก จำเป็นต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของอนุภาค คาร์บอนแบล็ก [19] เนื่องจากวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [20] ซึ่งโดยทั่วไป นิยมใช้เทคนิคการกระจายตัวด้วยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonication) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่มี การใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติม โดยการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นคลื่นทางกล ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของสารละลายและอนุภาคเกิดการสั่นไปมา จนทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตัวทำละลาย เปลี่ยนเป็นไอจำนวนมาก เมื่อไอเหล่านี้เกิดการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กซึ่งสามารถทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กจนอนุภาคกระจายตัวออกจากกันได้ [21,22] ทั้งนี้ ในการทำให้อนุภาคคาร์บอนแบล็ก กระจายตัวโดยใช้การสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องใช้ของเหลวหรือตัวทำละลายเป็นตัวกลางในการช่วยกระจายตัว ดังนั้น การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยต้องพิจารณาตามหลักการเข้ากันได้ของสารเคมี ร่วมด้วย

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาและวิเคราะห์การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลาย ทั่วไป 5 ชนิด คือ น้ำปราศจากไอออน (DI water), เอทานอล (Ethanol, EtOH), เมทานอล (Methanol, MeOH), อะซิโตน (Acetone) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl Ethyl Ketone, MEK) และทดสอบสมบัติด้านทานแรงดัดของวัสดุคอมโพสิต ที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพอกซีเรซินเป็นเนื้อสาร ในแง่ของความเค้น ณ จุดคราก เนื่องจากเป็นจุดเปลี่ยน โครงสร้างฐานถาวรของวัสดุ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพการคงรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วต่างกัน 5 ชนิด คือ ปราศจากไอออน EtOH, MeOH, Acetone และ MEK

2.2 งานวิจัยนี้ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพอกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยคาร์บอนแบล็ก ชนิดอะซิโตนแบล็ก

2.3 งานวิจัยนี้ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเทคนิคการหล่อขึ้นรูปบนแม่พิมพ์อะคริลิก

2.4 งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติความต้านแรงดัดในส่วนของความเค้น ณ จุดครากของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น NRT-TS500-50B หัวกดขนาด 10 ตัน และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม NNI-Testing Machine (V.4.0)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต เป็นการนำวัสดุ 2 ชนิด หรือมากกว่ามาผสมรวมกันจนเกิดวัสดุชนิดใหม่ โดยมีสมบัติหลักของวัสดุแต่ละชนิดคงเดิม แต่มีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ดีขึ้น เช่น สมบัติด้านการนำไฟฟ้า สมบัติด้านการนำความร้อน และสมบัติด้านการรับแรง ซึ่งโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ เนื้อสาร และสารเสริมแรง [1, 2, 3]

3.1.1 เนื้อสาร

เนื้อสารเป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด ทำหน้าที่ห่อหุ้มและยึดสารเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อให้สารเสริมแรงสามารถกระจายตัว และอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปเนื้อสารจะเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูง แต่มีความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าสารเสริมแรง เนื่องจากหน้าที่หลักของเนื้อสาร คือ ช่วยรักษาเสถียรภาพของรูปร่างและขนาด รักษาการกระจายตัวของสารเสริมแรง และยังทำหน้าที่กระจายแรงกระทำไปยังสารเสริมแรง เพื่อให้วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อแรงกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปเนื้อสารสามารถแบ่งตามวัสดุหลักได้ 3 ชนิด คือ โลหะ (Metal) เซรามิก (Ceramic) และโดยเฉพาะพอลิเมอร์ (Polymer) ประเภทเทอร์โมเซตเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นเนื้อสารในวัสดุคอมโพสิตยุคใหม่ [4] ตัวอย่างเช่น พอลิยูรีเทน (Polyurethane) พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) เนื่องจากโมเลกุลของเทอร์โมเซตมีการเชื่อมต่อกันเป็นแบบร่างแหจับกันแน่น มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงมาก และยังมีสมบัติทนความร้อนสูง

3.1.2 สารเสริมแรง

สารเสริมแรง เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยจะมีความแข็งแรงและค่ามอดูลัสที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเนื้อสาร สารเสริมแรงมีหน้าที่หลักในการรับแรงกระทำที่ถูกส่งผ่านมาจากเนื้อสาร ซึ่งขนาดและรูปร่างมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำให้สูงขึ้น โดยสารเสริมแรงอาจมีลักษณะและรูปร่างหลายแบบ เช่น แบบแผ่น เส้นใย ผืนผ้า และอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น วัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้ 4 แบบ คือ แบบอนุภาค (Particle) แบบเส้นใยสั้น (Whisker) แบบเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fiber) และแบบแผ่น (Sheet) [8]

3.2 อีพ็อกซีเรซิน

อีพ็อกซีเรซินเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต ที่ถูกพัฒนามาใช้ในกิจการอุตสาหกรรมตั้งแต่ ค.ศ.1974 โดยเริ่มใช้งานในรูปภาวนิดโลหะ และผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ในงานวิศวกรรมที่ต้องการความทนทานสูง เนื่องจากมีการหดตัวในระหว่างการบ่มตัว ดูดซับความชื้นต่ำ และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (25 - 150 องศาเซลเซียส) [1] วัสดุตั้งต้นของอีพ็อกซีเรซินเป็นของเหลวอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประกอบไปด้วย อีพอกไซด์ (Epoxide) และสารทำให้แข็งตัว (Hardener) เมื่อผ่านกระบวนการหล่อเรซิน (Epoxy Resin Casting) เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ระหว่างสารตั้งต้นสร้างพันธะระหว่างกันเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ จนมีโครงสร้างเครือข่ายสามมิติและจะคายความร้อนออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ระหว่างนี้ความหนืดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันหมด โดยมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

3.2.1 มีความแข็งแรง สามารถรับแรงกระทำกระดกกดทับได้ดี

3.2.2 ทนความร้อนได้สูงถึง 150 - 200 องศาเซลเซียส

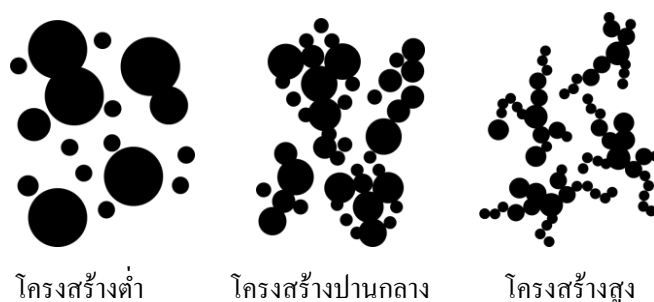
3.2.3 สามารถผสมสีเพิ่มความสวยงามให้ชิ้นงานตามต้องการ

3.2.4 มีคุณสมบัติเหมือนกาว ชิดเกาะกับผิววัสดุได้หลายชนิด เช่น ผสานกับไม้ พลาสติก และเหล็ก

3.2.5 สามารถใช้กับวัสดุเสริมแรงได้หลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นวัสดุกลุ่มออร์แกนิกหรืออินออร์แกนิก

3.3 คาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็ก เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้สภาวะควบคุมของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีหลากหลายชนิด ทำให้มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ทั้งในระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กสามารถสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง โดยอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมเชื่อมต่อกันคล้ายลูกโซ่ เรียกว่า “โครงสร้าง” และมีหมู่คาร์บอนซิล หรือหมู่ไฮดรอกซิลเกิดการสร้างพันธะกันขึ้นที่ผิวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กตามองค์ประกอบ จำนวน ขนาดและโครงสร้างของอนุภาค เรียกว่า “เคมีพื้นผิว” ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนแบล็ก และมีผลต่อความสามารถในการกระจายตัว ความเข้ม และลักษณะของสี เมื่อผสมกับสารอื่น หรืออีพอกซี [23] คาร์บอนแบล็กที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน หรือแก๊สที่มีปริมาณออกซิเจนมากเกินไปในเตาเผาขนาดใหญ่ จะสามารถผลิตคาร์บอนแบล็กได้ในปริมาณ และคุณภาพที่แตกต่างกัน เนื่องจากระบวนการผลิต เวลา และอุณหภูมิภายในเตาเผา มีผลต่อขนาดและการเชื่อมต่อกันของอนุภาคคาร์บอน ทำให้สามารถจำแนกคาร์บอนแบล็กออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ และการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ และสามารถแบ่งคาร์บอนแบล็กออกได้เป็นกลุ่ม (Group) และเกรด (Grade) จำนวนมาก อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ ๆ เป็น 5 กลุ่มหลัก ตามระบบของ IUPAC ได้แก่ 1) แชนแนลแบล็ก (Channel Black) ได้จากภาชนะรองรับกราบเขม่าที่เกิดจากการฟลักซ์ไฟฟ้าและควันไฟออกจากหัวฉีดเชื้อเพลิง มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10 - 30 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 50 - 200 นาโนเมตร 2) เฟอร์นาซแบล็ก (Furnace Black) เกิดในเตาเผาน้ำมัน (Oil Furnace) หรือไฮโดรคาร์บอนในสภาวะที่เป็นไอ (Refractory Chamber) มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 - 400 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 50 - 400 นาโนเมตร 3) อะซีทิลีนแบล็ก (Acetylene Black) ได้จากการเผาย่อยสลาย แก๊สอะซีทิลีนในสภาวะสูญญากาศ อนุภาคที่เกิดขึ้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี สามารถใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ มีขนาดอนุภาคประมาณ 30 - 50 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 350 - 400 นาโนเมตร กระบวนการผลิตอะซีทิลีนแบล็ก ถูกผลิตในเครื่องสังเคราะห์แบบปิด โดยใช้วิธีการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน สารตั้งต้นในการะบวนการผลิตสามารถย่อยสลายได้ภายใต้ความร้อนโดยอะซีทิลีนซึ่งไม่เสถียรทางความร้อน สามารถสลายพันธะไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจนเหลือเพียงคาร์บอน และฟอร์มตัวเป็นคาร์บอนแบล็ก 4) แลมป์แบล็ก (Lamp Black) ได้จากการเผาน้ำมันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดจากน้ำมันดิน (Coal Tar Creosote) โดยเผาภายในเตาเผาที่ควบคุมอากาศ มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 - 200 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 300 - 600 นาโนเมตร และ 5) เทอร์มัลแบล็ก (Thermal Black) มีได้จากการเผาย่อยสลายแก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) ในสภาวะสูญญากาศ โดยพ่นเชื้อเพลิงดังกล่าวลงบนผิวของเตาที่ร้อน (Heated Refractory) จนได้เทอร์มัลแบล็กที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 120 - 500 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มประมาณ 400 - 600 นาโนเมตร โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กส่งผลต่อความสามารถในการกระจายตัวและความเข้มของสี โดยทั่วไปการเพิ่มขนาดของโครงสร้างจะเพิ่มความสามารถในการกระจายทำให้มีความเข้มลดลง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก

3.4 เทคนิคการกระจายตัว

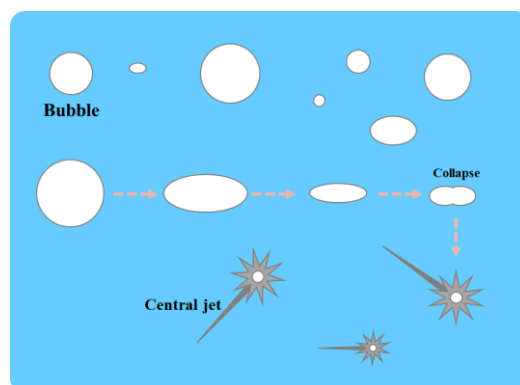
เทคนิคการกระจายตัวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Waves) เป็นเทคนิคที่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง และให้ผลการกระจายตัวที่ดี โดยคลื่นอัลตราโซนิก คือ พลังงานที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่าปกติ (มากกว่า 20,000 เฮิรตซ์) สั่นไปมาจนเกิดความดัน (Pressure Waves) โดยคลื่นเสียงจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของตัวกลางที่มีความยืดหยุ่น (Elastic Medium) ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Waves) แต่เมื่อคลื่นเสียงผ่านเข้าไปในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจอยู่ในลักษณะของคลื่นตามยาวหรือตามขวาง (Transverse Waves) โดยส่งผ่านพลังงานไปยังอนุภาคที่เกาะตัวกันให้สามารถแยกตัวออกจากกัน หรือสามารถกระจายตัวอย่างอิสระได้ ซึ่งหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เช่น การใช้เป็นเครื่องตรวจร่างกายเพื่อวินิจฉัยโรคในทางด้านการแพทย์ การล้างทำความสะอาดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ต้องการความสะอาดสูงในทางด้านวิศวกรรม ในทางด้านวิทยาศาสตร์นิยมใช้คลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการกระจายตัวของอนุภาคในสารละลายหรือตัวกลาง โดยมีหลักการในการกระจายตัวเบื้องต้นดังนี้ [24,25]

3.4.1 การทำให้เกิดและสลายฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกกระบวนการนี้ว่า “การเกิดโพรง (Cavitation)” โดยคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดฟองอากาศต่างชนิดกัน นั่นคือ ชนิดที่เกิดขึ้นแล้วแตกทันที (Temporary Bubble) และชนิดที่เป็นฟองอยู่ระยะหนึ่งแล้ว จึงแตก (Stable Bubble) ซึ่งการแตกของฟองอากาศเหล่านี้ ทำให้เกิดแรงดันมหาศาลจนดันให้อนุภาคที่เกาะรวมตัวกันกระจายตัวออกมา ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออก ได้เป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 ระยะเริ่มต้น (Initial Phase) เป็นระยะสร้างฟองอากาศทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความดัน 2 ทิศทาง (Dielectric Pressure) ในทิศตรงข้ามกัน ชนกันทำให้นิวเคลียส (อาจเป็นไอน้ำจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำถูกทำลายหรืออนุภาคนาโนขนาดเล็กอยู่ในตัวกลาง) ก่อเกิดเป็นฟองสุญญากาศ (Vacuum Bubble) ขึ้น

ระยะที่ 2 ระยะทำลายฟองขนาดใหญ่ (Catastrophic Phase) เป็นระยะที่เกิดฟองอากาศขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรจำนวนมากสลายฟองจากการทำลายฟองอากาศขนาดใหญ่ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ระยะที่ 3 ระยะสุดท้าย (Final Phase) เป็นระยะที่มีความดันสูง ซึ่งเกิดขึ้นจากฟองอากาศยุบตัวแล้วแตกออก (Collapse) เกิดเป็นแรงดันของของเหลว (Hydrostatic Pressure) ที่มีค่าสูงถึง 18,000 บรรยากาศ ฟุ้งออกจากฟองอากาศแต่ละฟอง เรียกว่า “เซนทรัลเจต (Central Jet)” ดังรูปที่ 2 จำนวนฟองอากาศและแรงระเบิดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับความถี่ ความแรงของคลื่นอัลตราโซนิก ความดัน ปริมาณแก๊สในตัวกลาง และอุณหภูมิของตัวกลาง หากตัวกลางมีความดันและปริมาณแก๊สมาก จะทำให้เกิดฟองอากาศได้น้อย ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงจะมีจำนวนฟองอากาศมากแต่แรงดันของของเหลวจะน้อยกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า



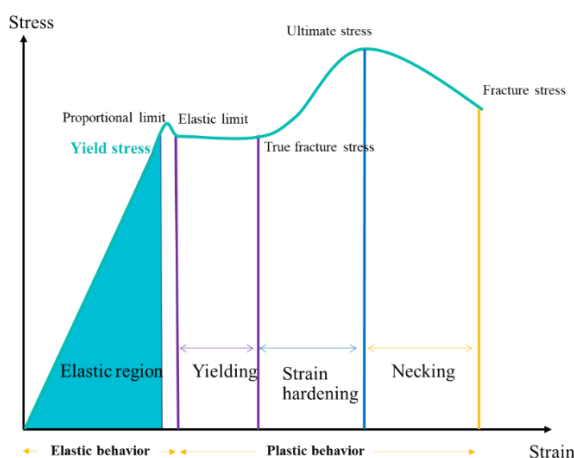
รูปที่ 2 การเกิดแรงดันของของเหลวเนื่องจากการแตกของฟองอากาศ

3.4.2 ความเร่งของของเหลว (Acceleration of Fluid) ซึ่งเกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกและแรงดูดตามรูเข็ม (Capillary Suction) ทำให้ของเหลวซึ่งเป็นตัวกลางเกิดความเร่งกระทำต่ออนุภาคที่เกาะตัว

3.4.3 ผลจากความร้อน (Thermal Effect) เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกให้กับสิ่งแวดล้อม มีผลให้ตัวกลางมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งช่วยให้อนุภาคบางชนิดกระจายได้ดีขึ้น

3.6 สมบัติด้านแรงดัด

สมบัติความต้านทานแรงดัด (Flexural Strength) คือ ความสามารถของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงดัด โดยแรงที่กระทำกับวัตถุจะส่งผลให้เกิดแรงดึงที่บริเวณด้านบนของชิ้นงาน และเกิดแรงอัดที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงาน ทำให้วัสดุเกิดความโค้งงอเสียรูปและเกิดความวิบัติในที่สุด [3] การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 เป็นมาตรฐานที่รองรับการทดสอบพลาสติกที่มีการเสริมแรงและไม่เสริมแรง โดยกำหนดให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามมาตรฐาน และทดสอบกดชิ้นงานด้วยหัวกดชิ้นงานตามแรงกดที่มีอัตราการกด (Crosshead Speed) คงที่ [25] การทดสอบนี้จะสามารถวัดค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ และสามารถรายงานเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ดังรูปที่ 3 โดยในระยะแรกสัดส่วนระหว่างความเค้น - ความเครียดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งสมบัติของวัสดุในบริเวณนี้สามารถคืนรูปเดิมได้ทันที เมื่อลดหรือถอดแรงกระทำ ซึ่งเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) แต่เมื่อให้แรงกระทำมากขึ้น หรือมากกว่าแรงกระทำก่อนหน้า จะทำให้วัสดุไม่สามารถคืนรูปเดิมได้ โดยเรียกการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งจะเกิดหลังจุดคราก นั่นคือ จุดครากเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของชิ้นงาน และยังเป็นจุดของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชิ้นงานจากแบบอีลาสติกเป็นแบบพลาสติก ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบวัสดุรองรับแรงกระทำต่าง ๆ



รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ของวัสดุคอมโพสิต

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

นำคาร์บอนแบล็กน้ำหนัก 0.02 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีการเตรียมตัวทำละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ต่างชนิดกัน ทั้งหมด 5 ชนิด นั่นคือ น้ำปราศจากไอออน, EtOH, MeOH, Acetone และ MEK จากนั้น ทำการสั่นด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก [22] ซึ่งเป็นการประยุกต์การกระจายตัวของอนุภาคโดยการสั่นด้วยเครื่องสั่นแบบอ่าง (Elma Elmasonic, E30H) และแบบโพรบ (Cole Parmer, Model CV334) โดยตั้งค่าการสั่นของเครื่องสั่นแบบอ่าง ที่ความถี่การสั่น 40 kHz กำลัง 130/180 W และเครื่องสั่นแบบโพรบ ที่ความถี่การสั่น 20 kHz กำลัง 500 W เป็นเวลา 30 นาที

4.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวและเสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

วิเคราะห์การกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายโดยการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Carl Zeiss Evo10) วิเคราะห์เสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กด้วยเทคนิคการตกตะกอน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 5 วัน และวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic Light Scattering Particle Size Analyzer) (Malvern, Zetasizer-Nano ZS)

4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดัด

นำคาร์บอนแบล็กที่ผ่านการกระจายตัวในตัวทำละลายด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกคู่ไปประเหจนมีสารละลายเหลือเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมกับอีพอกไซด์ และทำให้สารเข้ากันได้ดีโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกคู่อีกครั้งภายใต้อุณหภูมิห้อง และผสมกับสารทำให้แข็งตัว (อัตราส่วนระหว่างอีพอกไซด์กับสารทำให้แข็งตัวเท่ากับ 100 : 35 โดยน้ำหนัก) และไล่ฟองอากาศด้วยสุญญากาศเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเทคนิคการหล่อขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ซิลิโคน และทิ้งไว้ให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และอบเพื่อไล่ความชื้น และเพื่อให้สารทำให้แข็งตัวและสารอื่น ๆ ระเหยไป โดยใช้เตาอบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงด้านแรงดัดของชิ้นงาน

นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติด้านแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM D790 [23] ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) รุ่น NRT-TS500-50B ขนาดหัวกด 10 ตัน ที่ความเร็วหัวกด (Cross head Speed) เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร/นาที

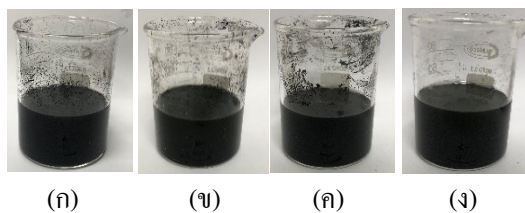
5. ผลการวิจัย

5.1 การกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

จากการเตรียมคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิด พบว่า คาร์บอนแบล็กไม่สามารถกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออนได้ ดังรูปที่ 4 เนื่องจากพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูง (มากกว่า 95 %) มีความเปียกชื้นต่ำ (Low Wettability) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [25, 26, 27, 28] และไม่มีความสามารถในการละลายในน้ำ ทำให้คาร์บอนแบล็กเกิดการรวมกลุ่มกัน และลอยอยู่เหนือผิวน้ำปราศจากไอออน อย่างไรก็ตามคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวได้ในสารละลายเอทานอล เมทานอล แอซีโตน และเมทิลเอทิลคีโตน ดังรูปที่ 5 อาจเนื่องมาจากสภาพความเป็นขั้วเล็กน้อยของคาร์บอนแบล็กกับตัวทำละลายละลายที่มีสภาพความเป็นขั้วมากกว่าน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4 ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน

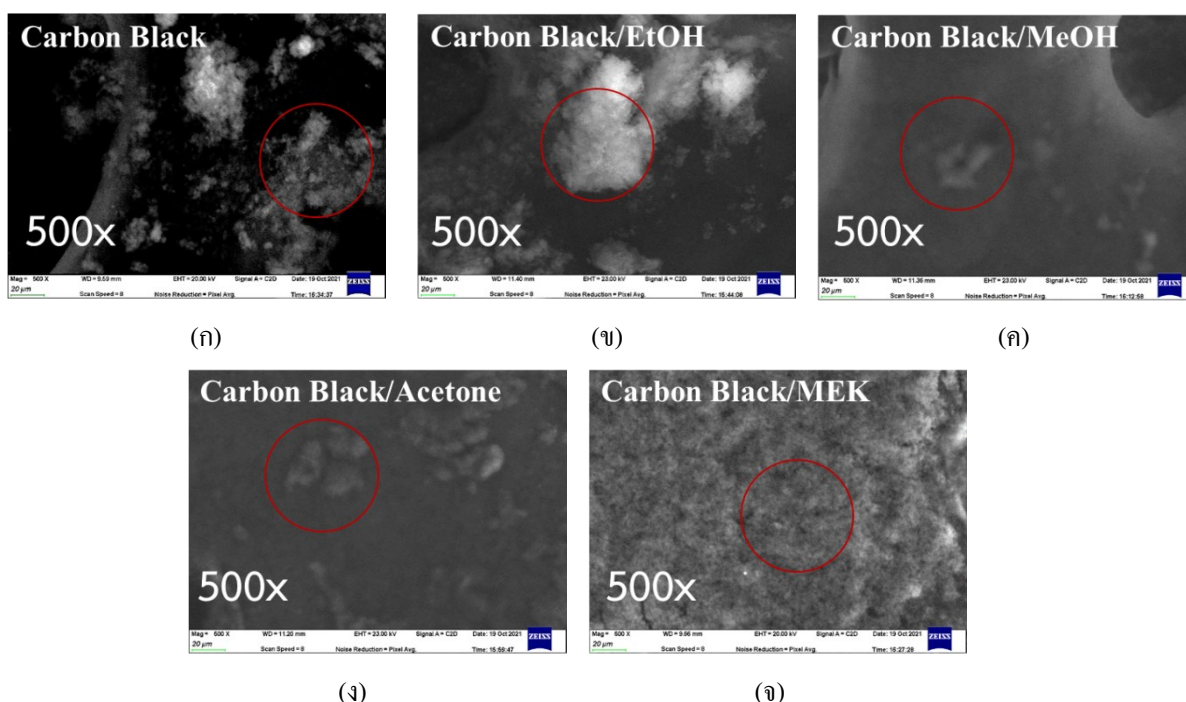


รูปที่ 5 ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน EtOH MeOH Acetone และ MEK
ภายหลังทำการสั่นด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

- (ก) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน EtOH
(ข) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน MeOH
(ค) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน Acetone
(ง) ภาพถ่ายคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวใน MEK

5.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวและเสถียรภาพของคาร์บอนแบล็กในสารละลาย

จากการสังเกตการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ด้วยภาพถ่ายพบว่า อนุภาคคาร์บอนแบล็กมีสีดำสนิทในทุกสารละลาย จึงทำการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า คาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัวในตัวทำละลาย สังเกตได้จากการเกาะตัวกันเป็นก้อนของอนุภาค ดังรูปที่ 6 (ก) อย่างไรก็ตามอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีการกระจายตัวออกจากกันดีขึ้นเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นกลุ่มอนุภาคนาขนาดเล็ก เมื่อผ่านการกระจายตัวในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ดังรูปที่ 6 (ข) – (ง)

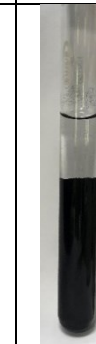


รูปที่ 6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า
แสดงอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัว และถูกกระจายตัวในสารละลายต่าง ๆ

- (ก) อนุภาครีบอนแบล็กที่ไม่ถูกกระจายตัว
- (ข) อนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย EtOH
- (ค) อนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MeOH
- (ง) อนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย Acetone
- (จ) อนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MEK

ในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก โดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารจะต้องศึกษาเสถียรภาพของอนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลายร่วมด้วย เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปต้องใช้เวลาในการเตรียมการขึ้นรูป ทำให้อนุภาครีบอนแบล็กอาจเกิดการรวมตัวหรือตกตะกอนอีกครั้ง ดังนั้น คณะวิจัยจึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของอนุภาครีบอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด โดยการติดตามการตกตะกอนของอนุภาครีบอนแบล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้แรงดันบรรยากาศ โดยมีผลการศึกษา แสดงดังตารางที่ 1

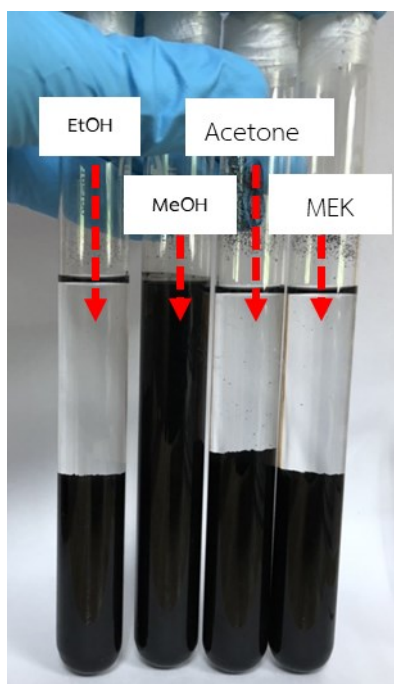
ตารางที่ 1 การตกตะกอนของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายต่าง ๆ

ตัวทำละลาย	เวลา (นาที)				
	0	30	60	120	180
EtOH					
MeOH					

ตารางที่ 1 (ต่อ) การตกตะกอนของคาร์บอนแบล็กในตัวทำละลายต่าง ๆ

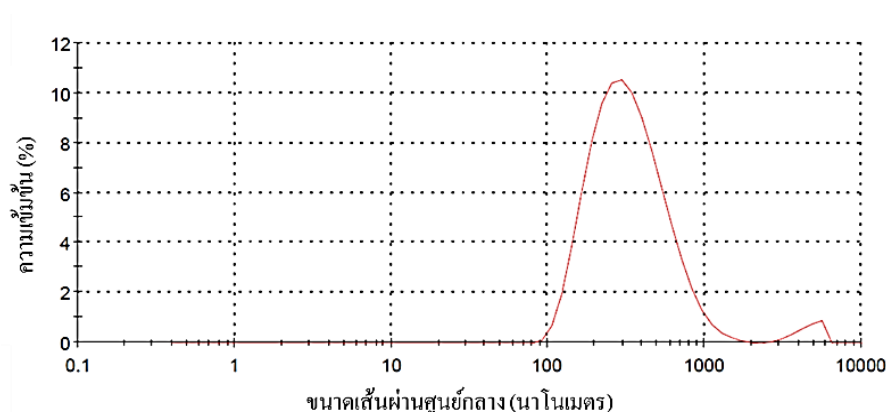
ตัวทำละลาย	เวลา (นาท)				
	0	30	60	120	180
Acetone					
MEK					

ผลการทดลองพบว่า คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย EtOH และ MEK เริ่มตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที และการตกตะกอนจะช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย Acetone เริ่มตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และเริ่มตกตะกอนช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ในขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในตัวทำละลาย MeOH ไม่สังเกตเห็นการตกตะกอนแม้เวลาจะผ่านไป 180 นาที นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเสถียรภาพเพิ่มเติม โดยนำคาร์บอนกระจายตัวในตัวทำละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK ใส่ในหลอดทดลองที่ปิดฝาสนิทด้วยแผ่นพาราฟิน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 5 วัน พบว่า คาร์บอนแบล็กในสารละลาย EtOH, Acetone และ MEK มีการตกตะกอนลงด้านล่างหลอดทดลอง มีเพียงคาร์บอนแบล็กในสารละลาย MeOH เท่านั้นที่ยังคงสามารถกระจายตัวอยู่ได้ โดยไม่เกิดการตกตะกอน แม้จะผ่านไป 5 วัน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 อนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ตกตะกอนในสารละลาย EtOH, MeOH, Acetone และ MEK เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน

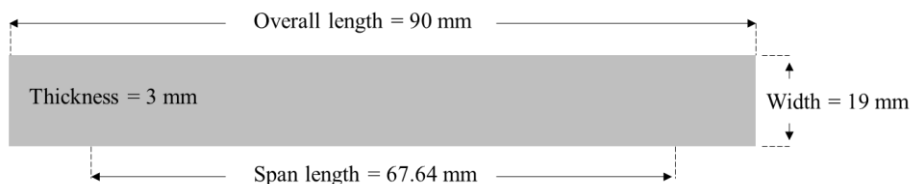
อย่างไรก็ตาม แม้ว่าคาร์บอนแบล็กจะสามารถกระจายตัวได้ในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด แต่คาร์บอนแบล็กจะเริ่มตกตะกอนลงด้านล่างมีเพียงสารละลาย MeOH เท่านั้น ที่ยังคงเสถียรและสามารถการกระจายตัวได้ดี ในการพิจารณาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยใช้เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย EtOH, Acetone และ MEK ไม่สามารถวัดการกระจายตัวได้ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ทำให้ลำแสงของเครื่องวัดขนาดอนุภาคไม่สามารถทะลุผ่านได้ ขณะที่คาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MeOH ยังคงกระจายตัวได้ จึงทำให้วัดขนาดอนุภาคได้ โดยขนาดอนุภาคที่วัดได้ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 298.2 นาโนเมตร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ทำการกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคร่วมเป็นเวลา 30 นาที

5.3 การขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดัด

ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดัดขึ้นรูปด้วยอีพ็อกซีเรซินและเสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กที่มีรูปร่าง และขนาดตามมาตรฐาน ASTM D790 ดังรูปที่ 9 โดยชิ้นงานมีลักษณะผิวเรียบ มีความเงา และมีสีดำกระจายทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 10



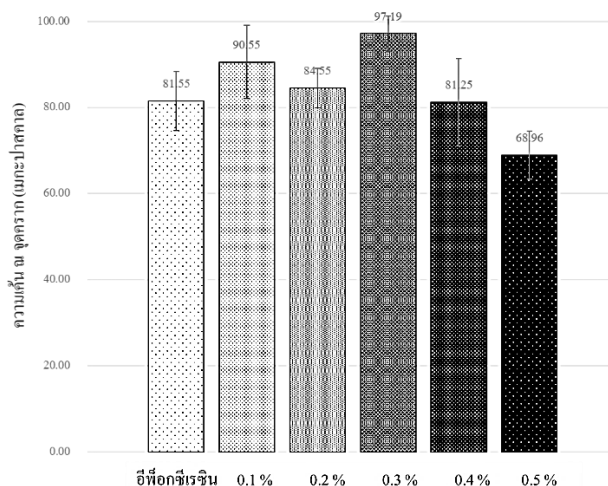
รูปที่ 9 ขนาดชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติด้านแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D790



รูปที่ 10 ตัวอย่างชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก

5.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดของชิ้นงาน

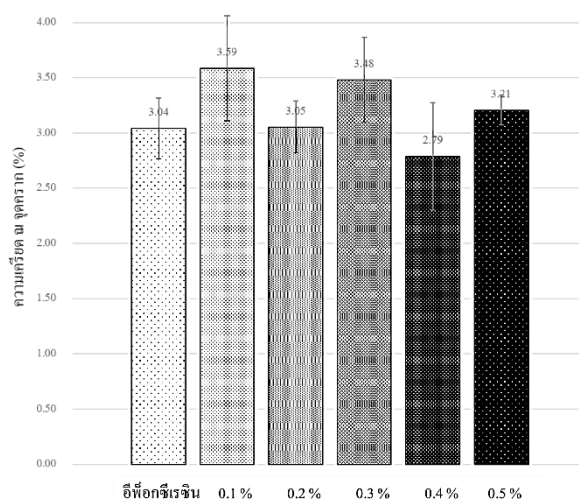
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติด้านแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดัดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมของคาร์บอนแบล็กที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ความเค้น ณ จุดคราก เริ่มต้นมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความเค้น ณ จุดครากสูงสุด ซึ่งสูงขึ้นจากค่าความเค้น ณ จุดคราก ของอีพ็อกซีเรซินถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากอนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายแรงกระทำไปยังเนื้อวัสดุจนทำให้สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป จะทำให้ความเค้น ณ จุดครากลดลง นั่นคือ ชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความเค้น ณ จุดครากลดลง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 11 ซึ่งเกิดจากอนุภาคคาร์บอนแบล็กมีปริมาณไม่เหมาะสม ทำให้มีจุดอ่อน (Weak Point) ระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กกับอนุภาคคาร์บอนแบล็ก หรืออนุภาคคาร์บอนแบล็กกับเนื้อวัสดุ แทนการกระจายแรงกระทำจากภายนอก



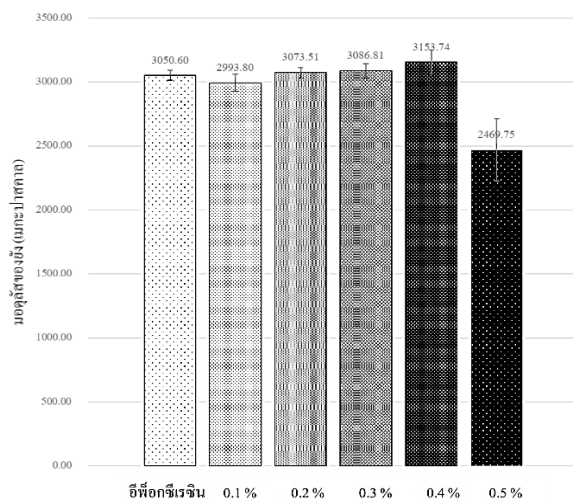
รูปที่ 11 ความเค้น ณ จุดครากของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก
ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความเค้น ณ จุดครากของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุส่วนใหญ่เป็นอีพ็อกซีเรซิน จึงยังคงสภาพการยึดหยุ่นไว้ได้ ดังรูปที่ 12 เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กคงสภาพวัสดุได้ใกล้เคียงกับวัสดุเดิม ดังรูปที่ 13

จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การใช้คาร์บอนแบล็กเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กมีความสามารถรับแรงกระทำ โดยที่ชิ้นงานยังคงสภาพได้ขึ้น แต่ต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสม ที่ปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 12 ความเค้นของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก
ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 13 มอดูลัสของแข็งของชิ้นงานคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก ในอัตราส่วนผสม 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

6. สรุป

6.1 อนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที ในสารละลาย EtOH, Acetone, MeOH และ MEK แต่ไม่สามารถกระจายตัวได้ในน้ำปราศจากไอออน

6.2 อนุภาคคาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวในสารละลาย MeOH โดยไม่การตกตะกอนแม้เวลาจะผ่านไป 5 วัน

6.3 ขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวในสารละลาย MeOH ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 298.2 นาโนเมตร

6.4 ชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารที่เตรียมสำหรับการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง มีค่าสัณฐานจากอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน

6.5 การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตที่มีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารด้วยอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ผ่านการกระจายตัวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกได้เป็นเวลา 30 นาที ในสารละลาย MeOH สามารถเพิ่มสมบัติด้านแรงดึงได้ โดยคาร์บอนแบล็กปริมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความเค้น ณ จุดคราก ได้สูงถึง 19 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่ามอดูลัสของแข็งมีค่าคงเดิม

7. ข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็กโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเนื้อสารตามขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อผลของการกระจายตัวอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อสารอีพ็อกซีเรซิน การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อสารชนิดอื่น ๆ การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตด้วยอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลอื่น ๆ เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณรายจ่ายอุดหนุนและคุณสมบัติของอาจารย์ รร.นง. ทั้งนี้ คณะวิจัยขอขอบพระคุณ ร.อ.ณัฐวัฒน์ ภูักดี และ ร.ท.หญิง พิชญ์ธิดา จิตตมาโร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ จนทำให้โครงการวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการบริหารงบประมาณรายจ่ายอุดหนุนและคุณสมบัติของอาจารย์ งานวิจัย รร.นง. ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญรักษ์ กาญจนวราวิชช์. (2558). **โพลิเมอร์คอมโพสิต**. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [2] อาดิละห์ ศิริวัลลภ. (2558). วัสดุเชิงประกอบจากโพลิเอสเตอร์รีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา).
- [3] สมิต วิลเลียม เอฟ. (2544). **Principles of Materials Science and Engineering**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตชั่นแนล.
- [4] หฤทกั กิรติเสว, นัตรชัย วีระนิติสกุล และ อภิรัตน์ เล่าห์บุตร. (2553). ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 22(12): 18-32.
- [5] ธนินทร์รัฐ สิทธิเวชธนาศิริ, ละอองดาว วรรณฤทธิ์ และ ชสพล พงษ์แก้ว. (2021). การศึกษาการเพิ่มขีดความสามารถด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นายเรืออากาศ, 17(2): 54 -68.
- [6] จันทร์ฉาย ทองปิ่น และ สุดศิริ เหมศรี. (2548). การใช้ยางธรรมชาติที่ถูกดัดแปรเพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพอกซีเรซิน. วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [7] เอนก ภู่อานงค์. (2553). วัสดุอีพอกซีเรซินกับการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ฉบับมหาชน - มิถุนายน : 14-20.
- [8] Przemyslaw, D., Pastuszek & Aleksander Muc. (2013). Application of Composite Materials in Modern Constructions. *Key Engineering Materials*.13(542): 119 - 129.
- [9] Ateeq Rahman, Ilias Ali, Saeed M. AL Zahrani & Rabeh H. Eleithy. (2013). A REVIEW OF THE APPLICATIONS OF NANOCARBON POLYMER COMPOSITES. *NANO: Brief Reports and Reviews*. 11(6): 185-203.
- [10] Andrei Honciuc. (2021). **Chemistry of Functional Materials Surfaces and Interfaces**. Dutch: Elsevier.
- [11] Ming Yuan Shen , Wen Yuan Liao, Tan Qi Wang & Wei Min Lai. (2021). Characteristics and Mechanical Properties of Graphene Nanoplatelets-Reinforced Epoxy Nanocomposites: Comparison of Different Dispersal Mechanisms. *Sustainability*. 21(13): 1-18.
- [12] Li, H.Y., Chen, H.Z., Xu, W.J., Yuan, F., Wang, J.R. & Wang, M. (2005). Polymer-Encapsulated Hydrophilic Carbon Blacknanoparticles Free From Aggregation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 5(254): 173-178.
- [13] Jakab, E. & Omastová, M. (2005). Thermal decomposition of polyolefin/carbon black composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 5(74): 204-214.
- [14] Zhang, W., Zhang, X., Liang, M. & Lu, C. (2008). Mechanochemical Preparation of Surface-Acetylated Cellulose Powder to Enhance Mechanical Properties of Cellulose-Filler-Reinforced NR Vulcanizates. *Composites Science and Technology*, 8(68): 2479-2484.
- [15] Khalil, H.A., Firoozian, P., Bakare, I.O., Akil, H.M. & Noor, A.M. (2010). Exploring Biomass Based Carbon Black as Filler in Epoxy Composites: Flexural and thermal properties. *Materials & Design*, 10(31): 3419-3425.

- [16] Kuzhir, P., Paddubskaya, A., Plyushch, A., Volynets, N., Maksimenko, S., Macutkevici, J., Kranauskaite, I., Banys, J., Ivanov, E., Kotsilkova, R. & Celzard, A. (2013). Epoxy Composites Filled with High Surface Area-Carbon Fillers: Optimization of Electromagnetic Shielding, Electrical, Mechanical, and Thermal Properties. *Journal of Applied Physics*. 13(114): 164304-1 -164304-7.
- [17] Yue, J., Xu, Y. & Bao, J. (2017). Epoxy - carbon black composite foams with tunable electrical conductivity and mechanical properties: Foaming improves the conductivity. *Journal of Applied Polymer Science*, 17(134): 45071-1 - 45071-10.
- [18] Tanusree Bera, S.K. Acharya & Punyapriya Mishra. (2018). Synthesis, mechanical and thermal properties of carbon black/epoxy composites. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 18(10): 12-20.
- [19] Chifei We, Shigeo Asai, Masao Sumita, & Keizo Miyasaka. (1992). Dispersion of Particle in Polymer Composites Filled with Carbon Black Studied by Scanning Electron Microscopy Observation. *Integration of CiNii Articles into CiNii Research*. 92(48): 69 - 72.
- [20] Ai-Jie Ma, Weixing Chen, Yonggang Hou & Gai Zhang. (2010). Dispersion, Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin Composites Filled with the Nanometer Carbon Black. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 10(49): 916 - 920.
- [21] Boris I. Kharisov, Oxana V. Kharissova & Ubaldo Ortiz Méndez. (2014). Methods for Dispersion of Carbon Nanotubes in Water and Common Solvents. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 14(1700): 109 -114.
- [22] Shouci Lu, Robert J. Pugh & Eric Forssberg. (2005). **Interfacial Separation of Particles**. London: Science Direct.
- [23] วัชรพันธุ์ มณีรัตน์. (2549). การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ โดยใช้คาร์บอนแบล็ก. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร).
- [24] Julian, S., Taurozzi, Vincent A., Hackley & Mark R. Wiesner. (2011). Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment - issues and recommendations. *Nanotoxicology*. 11(5): 711-729.
- [25] Thomas Hielscher. (2005). ULTRASONIC PRODUCTION OF NANO-SIZE DISPERSIONS AND EMULSIONS. ENS'05 Paris, France, 14-16 December 2005.
- [26] จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์. (2557). การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แม่ลามีน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา).
- [27] Nathawat Poopakdee & Warut Thammawichai. (2019). FABRICATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE AND CELLULOSE MICROFIBRIL REINFORCED EPOXY COMPOSITE. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 19(7): 39 - 43.
- [28] ASTM D790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International.
- [29] Ridaoui, H., Jada, A., Vidal, L. & Donnet, JB. (2006). Effect of cationic surfactant and block copolymer on carbon black particle surface charge and size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 278(1-3):149 -159.
- [30] Hsiang Yi Hsieh & Weng Tung Cheng. (2021). Fabrication and Stabilization of Oxidized Carbon Black Nanoparticle Dispersion in Aqueous Solution for Photothermal Conversion Enhancement. *ACS Omega* 2021. 21(6): 3693-3700.

การพัฒนาและประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญา และอัตลักษณ์ไทยใน 4 ภูมิภาคด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

Development and Evaluation of Process Architecture for Designing Thai Wisdom Alphabet Set and Identity in 4 Regions with Artificial Intelligence Technology

^{1*}บุญชม สูดจิตต์, ^{2#}ธนา สุขวาริ และ ^{3#}ประสงค์ ปราณีตพลกรัง

^{1,2} สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

³ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*}Boonchom Sudjit, ^{2#}Thana Sukvaree and ^{3#}Prasong Praneetpolgrang

^{1,2} Information Technology Program, School of Information Technology, Sripatum University

³ Computer Science Department, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

*sudjit99@gmail.com, #thana.su@spu.ac.th, #prasong_pr@rtaf.mi.th

Received : July 17, 2022

Revised : October 11, 2022

Accepted : December 22, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทยใน 4 ภูมิภาค โดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เป็นการนำเสนอกระบวนการออกแบบตัวอักษรกราฟิกประยุกต์โดยใช้ปัจจัยเกี่ยวกับอัตลักษณ์ ศิลปวัฒนธรรม และประเพณีของท้องถิ่นในแต่ละภูมิภาค งานวิจัยนี้มีการดำเนินการ 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย 1) การเก็บรวบรวมข้อมูล 2) การออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการ 3) การประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการ และ 4) การออกแบบชุดอักษรต้นแบบ 4 ภูมิภาค ผลวิจัยได้สถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงบิกดาตาของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 1 ภูมิภาค และพบว่า 1) สถาปัตยกรรมกระบวนการมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 5.00$) 2) ผลการประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการเฉลี่ยโดยรวม พบว่าผู้เชี่ยวชาญมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.85$) 3) เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สามารถสร้างความแม่นยำในการตรวจสอบรูปภาพเกี่ยวกับภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ศิลปะของแต่ละภาคของไทยทั้ง 4 ภูมิภาค สามารถนำไปใช้ในกระบวนการพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ได้ และสามารถจำแนกรูปภาพเกี่ยวกับภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ศิลปะของไทยได้อย่าง แม่นยำโดยมีค่าเท่ากับ 0.7

คำสำคัญ: ชุดอักษรภูมิปัญญา, สถาปัตยกรรมกระบวนการ, ปัญญาประดิษฐ์

Abstract

This research aims to develop and evaluate process architecture for designing Thai wisdom alphabets and Thai identity in four regions. There are four stages of research: 1) data collection, 2) process architecture design, 3) process architecture evaluation and 4) 4 regional prototype sets design. The result of research was revealed process architecture for designing Thai wisdom alphabet set and identity in 4 regions with artificial intelligence technology and showed that 1) the process architecture is mostly appropriate ($\bar{X} = 5.00$) 2) the satisfaction of process architecture from the experts is at the highest level ($\bar{X} = 4.85$) and 3) The artificial intelligence technology with the processing evaluation value at 0.7 can generate the accuracy of visual inspection of the wisdom and artistic identity of each of the 4 four regions in Thailand. In addition, it can be used to develop a series of applied graphical letters with artificial intelligence technology and it can accurately classify the analyzed wisdom and artistic pictures.

Keywords: Wisdom Alphabet Set, Process Architecture, Artificial Intelligence

1. บทนำ

ประเทศไทยได้ให้ความสำคัญในการสร้างอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทย ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องหมายที่แสดงออกถึงความเป็นเอกลักษณ์ของวัฒนธรรมประจำชาติที่ใช้ในการสื่อสาร เพื่อสื่อความหมายสร้างความเข้าใจของคนในสังคม ถือเป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่มีความงดงามและมีคุณค่าอันสูงยิ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเจริญรุ่งเรืองทางด้านวัฒนธรรมของชาติ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีดิจิทัลมีบทบาทความสำคัญต่อการพลิกฟื้น ปรับปรุงพัฒนาระดับประสิทธิภาพการทำการธุรกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการใช้สื่อประชาสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่ ๆ ที่เป็นสื่อโฆษณาดิจิทัลนั้นมีบทบาทมาก เพราะจะดึงดูดให้ผู้บริโภคเกิดความสนใจ รวมถึงความเข้าใจได้ง่ายและรวดเร็วต่อสินค้าและบริการ ในขณะที่การออกแบบอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยก็นำเอาเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาประยุกต์ใช้เช่นเดียวกัน กล่าวคือ การใช้สื่อใหม่ในรูปแบบของดิจิทัลจะทำให้การสื่อสารเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการออกแบบกราฟิกสื่อโฆษณาและประชาสัมพันธ์ที่ใส่อัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยของแต่ละภาคเข้าไปผ่านทางรูปภาพ สี สัน หรือตัวอักษรอันเป็นข้อความที่สามารถอ่านแล้วเข้าใจได้ ซึ่งจะเป็นการเสริมสร้างความสนใจ เข้าใจ เข้าถึงในความรู้สึกและให้ความรู้เกี่ยวกับสินค้าและบริการของบริษัทหรือหน่วยงานแก่ลูกค้าหรือผู้ใช้ได้มากขึ้น ในลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้ผู้บริโภคที่อยู่ในชุมชนท้องถิ่นนั้น ๆ มีความรู้สึกภาคภูมิใจ ผูกพันในอัตลักษณ์ของความเป็นไทยในแต่ละภาค

แท้จริงแล้ว ขนบธรรมเนียมประเพณี วิถีชีวิตความเป็นอยู่ของคนไทยในแต่ละภูมิภาคก็มีอัตลักษณ์เฉพาะตัว ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลสมัยใหม่ควรต้องคำนึงถึงบริบทของคนที่นำไปสู่พื้นฐานความเป็นอยู่ด้วย ทุกวันนี้การจะเข้าถึงความต้องการของผู้ใช้หรือลูกค้าควรให้ความสำคัญกับวัฒนธรรม วิถีชีวิตของคนในสังคมหรือชุมชนท้องถิ่นในแต่ละภูมิภาคด้วย อย่างไรก็ตาม การสร้างคุณภาพ ความแตกต่างและมูลค่าเพิ่มให้แก่สินค้าหรือบริการนั้น ๆ ต้องอาศัยเทคโนโลยีดิจิทัลที่มีความเหมาะสมกับศิลปะการออกแบบและการตลาดประกอบด้วย ดังนั้นในการออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทยจึงจำเป็นต้องบูรณาการด้านศิลปวัฒนธรรมที่ทรงคุณค่าท้องถิ่นมาใช้ในการสื่อดิจิทัลของแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยด้วย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการตอบใจของภูมิภาคได้อย่างชัดเจนตรงประเด็น

จากความเป็นมาความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจทำการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการในการออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทย และประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการฯ ดังกล่าวว่ามีเหมาะสมกับการพัฒนาชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทยอย่างไร ทั้งนี้จะสามารถสนับสนุนสื่อโฆษณาดิจิทัลให้เกิดความน่าสนใจสวยงาม รวมทั้งส่งผลให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชนท้องถิ่นได้มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นต่อไป

2. ขอบเขตของงานวิจัย

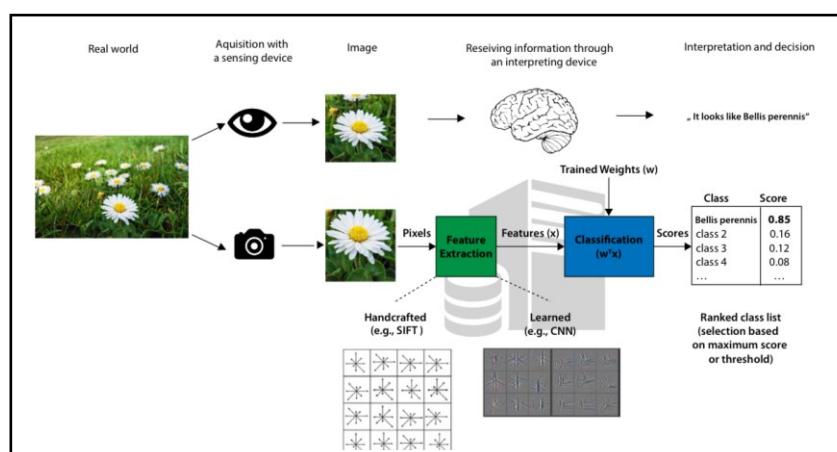
งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

2.1 ทำการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทยใน 4 ภูมิภาค ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

2.2 ทำการพัฒนาและประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับออกแบบชุดอักษรภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ไทยใน 4 ภูมิภาค ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

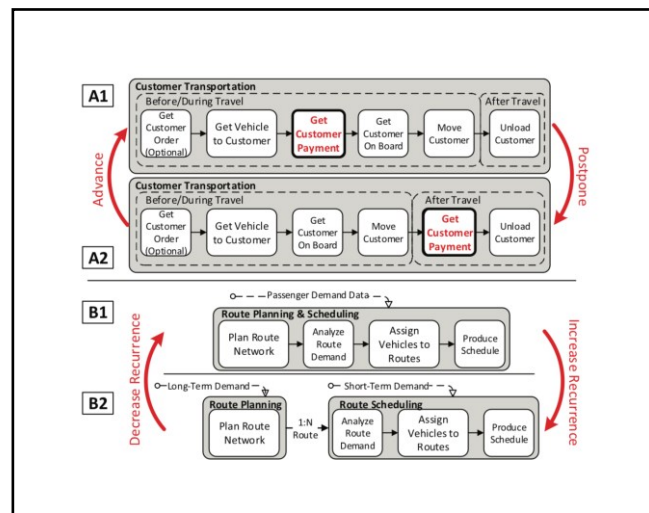
[1] มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสถานะที่ล้ำสมัยในปัจจุบัน มาสู่การใช้ในเทคนิคในการระบุอัตโนมัติ และเพื่อการวิจัยทางอนุกรมซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญของเวิร์กโฟลว์ในการวิจัยทางชีววิทยา โดยใช้วิธีการเทคนิคที่จะทำให้ประสิทธิภาพความรวดเร็ว ตอบสนองความต้องการในการระบุตัวบนบนอุปกรณ์มือถืออัจฉริยะผ่านกล้องดิจิทัล ยังรวมถึงการแปลงคอลเล็กชันที่เกิดจากธรรมชาติเป็นดิจิทัลจำนวนมากนำไปสู่กระบวนการกระจายข้อมูลภาพ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นในมิติต่าง ๆ ด้วยการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของข้อมูลภาพทางชีวภาพกับวิธีการเรียนรู้ของเครื่องที่ทันสมัย ได้แก่ การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning : DL) [2],[3] สำหรับการระบุพืชชนิดอัตโนมัติ นำไปสู่การกระตุ้นในการทำงานมากยิ่งขึ้นในแนวทางแมชชีนเลิร์นนิง ที่จะนำมาใช้ด้านการระบุพืชชนิดของการใช้เทคนิคเหล่านี้ นำไปใช้กับปัญหาในอนาคตของระบบปัญญาประดิษฐ์ในการประยุกต์ใช้ต่อไป รายละเอียด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การมองเห็นของมนุษย์และคอมพิวเตอร์สำหรับการระบุชนิดพันธุ์ แพลตฟอร์มแมชชีนเลิร์นนิงของรูปภาพ [1]

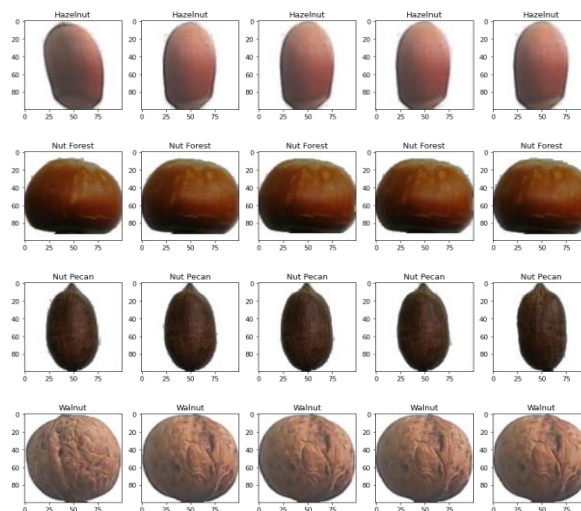
การวิจัยในกระบวนการที่หลากหลายและครอบคลุมตั้งแต่การทำงานซึ่งการกำหนดรายละเอียดแบบวันต่อวัน ไปจนถึงการทำงานในระยะยาว ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันเป็นสถาปัตยกรรมกระบวนการทางธุรกิจ [4],[5] (Business Process Architecture: BPA) ขององค์กรนั้น มีการวิเคราะห์ออกแบบกระบวนการอย่างเป็นกรอบการออกแบบ

แผนทางธุรกิจที่นำมาใช้ คือ การออกแบบ BPA ได้รับการพิจารณาความสมดุลของความยืดหยุ่น ความคล่องตัวเป็นไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ต้นทุนและประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเลือกการชำระเงินสำหรับการเดินทาง: (A1) ก่อนสิ้นสุดการเดินทาง (A2) เมื่อสิ้นสุดการเดินทาง การแยกขั้นตอนเดียว (B1) ออกเป็นหลายขั้นตอน (B2) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นหรือรวมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพ [4]

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยเทคนิคการประมวลผลภาพสำหรับการตรวจจับ [3], [6] ซึ่งใช้ชุดข้อมูลภาพด้วยการสังเกตและแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับถั่วประเภทต่างๆ โดยใช้ Deep Learning (DL) ด้วยวิธีการประมวลผลทุกมิติ หรือการผสมผสานของการประมวล เช่น การหมุนแบบสุ่ม การเคลื่อนไหว การตัด และการพลิกกลับโมเดล DL ซึ่งได้รับการพัฒนาบนพื้นฐานของ Convolutional Neural Networks (CNN) โดยใช้ Python ใน Google Colaboratory หรือแพลตฟอร์ม “Colab” การใช้สภาพแวดล้อมของ Google ช่วยให้เข้าถึง GPU ได้ฟรี และต้องมีการกำหนดค่าบางอย่าง ชุดข้อมูล 1,595 ภาพของถั่วสี่ประเภทที่แตกต่างกันถูกใช้สำหรับการฝึกอบรม ตรวจสอบ และทดสอบในแบบจำลอง โมเดลที่ผ่านการฝึกอบรมมีความแม่นยำถึง 100% ที่ใช้ในการทดสอบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างชุดข้อมูล [3]

การพัฒนาแบบจำลองในการจัดหมวดหมู่ของภาพโครงข่ายประสาทเทียมจึงต้องใช้ทางด้านวิศวกรรมสถาปัตยกรรมที่สำคัญ ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเรียนรู้สถาปัตยกรรมแบบจำลองโดยตรรกะชุดข้อมูล [8] เนื่องจากวิธีนี้มีราคาแพงเมื่อชุดข้อมูลมีขนาดใหญ่ จึงเสนอให้ค้นหา Building Block ทางสถาปัตยกรรมในชุดข้อมูลขนาดเล็ก จากนั้นจึงโอนบล็อกไปยังชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ผลงานที่สำคัญของงานนี้คือ การออกแบบพื้นที่การค้นหาใหม่ (ซึ่งเราเรียกว่า “พื้นที่การค้นหาของ NASNet”) ซึ่งทำให้สามารถถ่ายโอนได้ ในการทดลองของเรา เราค้นหา Convolutional Layer (หรือ “เซลล์”) ที่ดีที่สุดบน CIFAR-10 ชุดข้อมูล จากนั้นนำเซลล์ที่ได้ไปใช้กับชุดข้อมูล ImageNet โดยการซ่อนสำเนาของเซลล์นี้หลาย ๆ โดยแต่ละชุดมีพารามิเตอร์ของตนเองเพื่อการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบ Convolutional ซึ่งเราตั้งชื่อว่า “NASNet” รุ่นเล็ก ผลลัพธ์ที่ได้คือ มีความแม่นยำสูงสุด 74% ซึ่งดีกว่ารุ่นที่ทันสมัยและมีขนาดเท่ากัน 3.1% สำหรับแพลตฟอร์มมือถือ สุดท้ายคุณลักษณะของภาพที่เรียนรู้จากการจัดประเภทภาพมีประโยชน์โดยทั่วไป และสามารถถ่ายโอนไปยังปัญหาการมองเห็นอื่น ๆ ของคอมพิวเตอร์ได้ หรือในงานการตรวจจับอวัยวะ คุณลักษณะที่เรียนรู้ โดย NASNet ที่ใช้กับเฟรมเวิร์ก Faster-RCNN เหนือกว่าความล้ำหน้า 4.0% บรรลุ m AP 43.1% ในชุดข้อมูล COCO

จากผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาค้นพบว่า การพัฒนาและสถาปัตยกรรมกระบวนการมีความเป็นขั้นตอนแบบแผนของวิธีการในหลากหลายมิติที่ทำให้มีความรวดเร็วต่อการพัฒนาของการเรียนรู้เชิงลึก หรือแมชชีนเลิร์นนิงที่ให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผล และขั้นตอนของกระบวนการ Google Colab [9],[10],[11],[12],[13] ที่จะนำมาประยุกต์ต่อไป

4. การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูล

ขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยดำเนินการศึกษาและนำเอาภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ศิลปะของอักษรไทยจำนวน 4 ภูมิภาค เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการและการออกแบบชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์

4.2 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

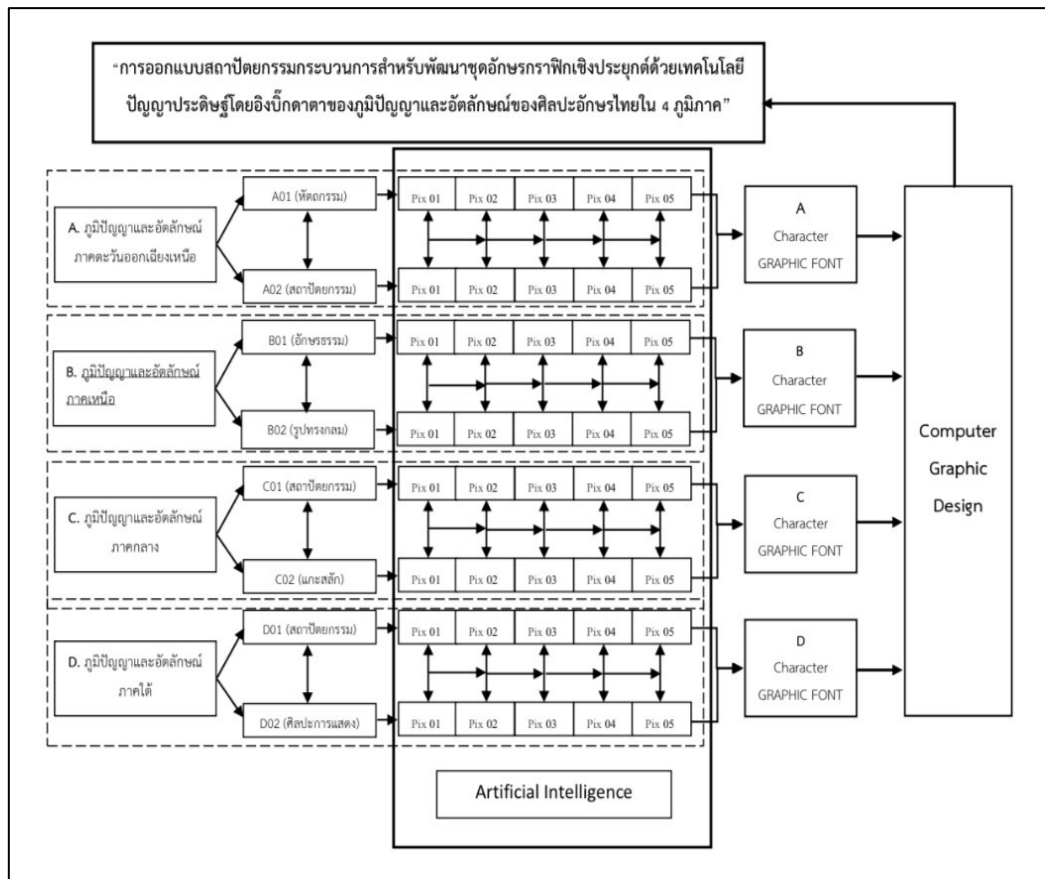
ขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ศิลปะของแต่ละภาคของไทย จำนวน 4 ภูมิภาค เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการและพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง ประกอบด้วย 1) ศูนย์การเรียนรู้ดิจิทัลชุมชน 2) ศูนย์วัฒนธรรม 3) ผู้เชี่ยวชาญ 4) มหาวิทยาลัยฯ และหน่วยงานอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง จำนวน 357 คน อีกทั้ง ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมรูปภาพเกี่ยวกับศิลปะวัฒนธรรม ประเพณี วัด ของแต่ละภาค เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงอัตลักษณ์ของแต่ละภาค โดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ช่วยในการวิเคราะห์

4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้ตอบแบบสอบถามจำนวนทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเชื่อมโยงของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะในแต่ละภูมิภาคของไทยทั้ง 4 ภูมิภาค เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการ และพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์

4.4 ขั้นตอนการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการและนำไปพัฒนาชุดอักษรเชิงประยุกต์ต่อไป และสถาปัตยกรรมกระบวนการได้แสดงไว้ในรูปที่ 4



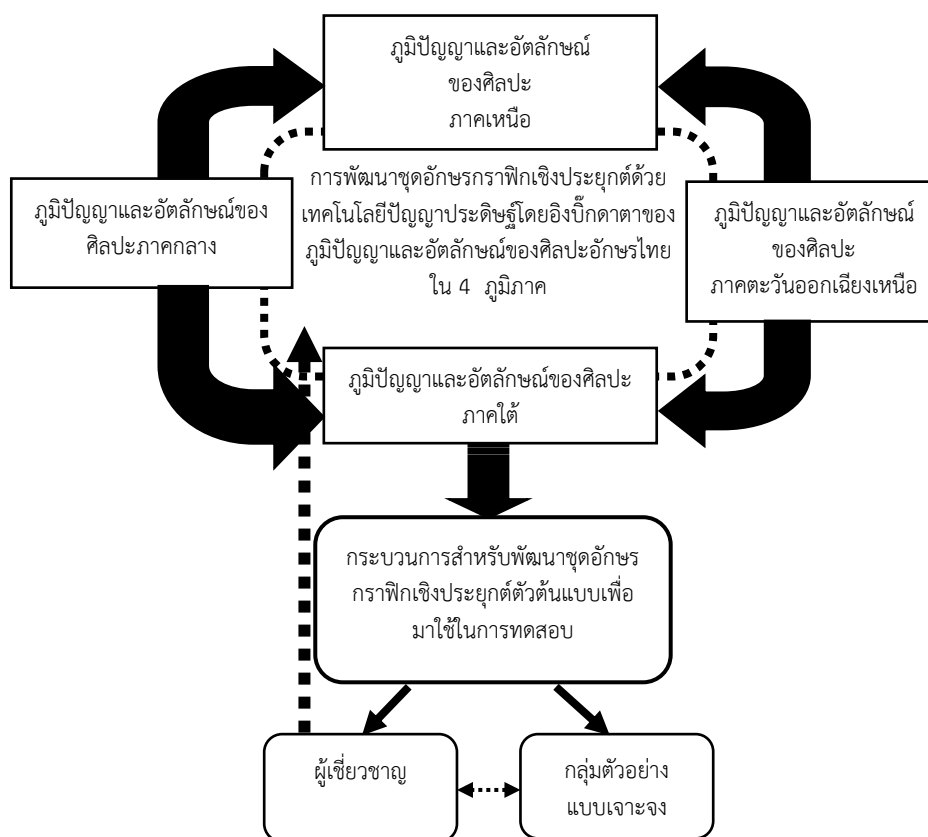
รูปที่ 4 การออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงบิกดาของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค

4.5 ขั้นตอนการประเมินสถาปัตยกรรมกระบวนการ

หลังจากผู้วิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการในขั้นตอนที่ 3.4 เรียบร้อยแล้วแล้วผู้วิจัยนำผลของการออกแบบ สถาปัตยกรรมกระบวนการและชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ไปทำการประเมิน โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 4 คน

4.6 ขั้นตอนการพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์

ขั้นตอนนี้ เป็นการนำผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 4 คน มาทำการพัฒนาชุดอักษรต้นแบบ 4 ภูมิภาคของ ประเทศไทย โดยการพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ที่อิงบิกดาของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาคนั้น สามารถใช้สนับสนุนการตัดสินใจให้กับชุมชนท้องถิ่นในการเลือกชุดตัวอักษรหรือ ผลิตภัณฑ์ที่มีการจัดวางรูปแบบที่สวยงาม โดดเด่นในอัตลักษณ์ที่มีความเหมาะสมในแต่ละภูมิภาคมากยิ่งขึ้น กระบวนการ สร้างการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยอิงบิกดาของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์
โดยอิงบิกดาตาของภูมิภาคปัญหาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรูปภาพเกี่ยวกับภูมิภาคปัญหาและอัตลักษณ์ศิลปะของแต่ละภาคของไทยทั้ง 4 ภูมิภาค มาใช้ในการพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ ซึ่งในการประมวลผลภาพสำหรับการจำแนกรูปภาพ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.6.1 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลรูปภาพเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทย โดยผู้วิจัยมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลสถาปัตยกรรมที่นำเสนอในวัดของแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลของแต่ละภูมิภาค

4.6.2 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยดำเนินการจัดกลุ่มข้อมูลอัตลักษณ์ของแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยรวมเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วยภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6



ภาคเหนือ

ภาคกลาง

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ภาคใต้

รูปที่ 6 วัดในแต่ละภาคของประเทศไทย (Google.com) [12],[13]

4.6.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองมี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนของการเรียนรู้ (Train) เพื่อสร้างแบบจำลองและขั้นตอนของการทดสอบ (Test) การสร้างแบบจำลองนี้เป็นขั้นตอนการสอนให้เครื่องเกิดการเรียนรู้ใช้ข้อมูลรูปภาพวัดและศิลปะวัฒนธรรมทั้ง 4 ภาคโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามภาค โดยใช้ข้อมูลรูปภาพสำหรับการเรียนรู้จำนวนภาคละ 800 รูปรวมเป็น 3,200 รูป และรูปภาพสำหรับการทดสอบจำนวนภาคละ 200 รูป รวมเป็น 800 รูป โดยใช้อัลกอริทึมของ CNN (Convolution Neural Network)

4.6.4 ขั้นตอนวัดประสิทธิภาพ

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยดำเนินการวัดประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบค่าความแม่นยำในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้การวัดค่าความแม่นยำ (Accuracy) เป็นค่าที่ได้จากการหาค่าทำนายความถูกต้องของข้อมูลโดยคิดเป็นค่าร้อยละ (%) สามารถแสดงสูตรคำนวณ ได้ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่

Accuracy คือ ค่าความแม่นยำ

TP คือ ค่าที่ทำนายถูกต้องเชิงบวก

TN คือ ค่าที่ทำนายถูกต้องเชิงลบ

FP คือ ค่าที่ทำนายผิดพลาดเชิงบวก

FN คือ ค่าที่ทำนายผิดพลาดเชิงลบ

4.7 ขั้นตอนสรุปและประเมินผลการวิจัย

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ที่อึ้งภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ นำไปสู่การออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงบีกดาตาของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค ทั้งนี้ ในตารางที่ 1 ได้แสดงการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อสถาปัตยกรรมกระบวนการฯ ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงข้อความการประเมินความพึงพอใจในสถาปัตยกรรมกระบวนการฯ

ข้อความ	ระดับความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญ		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. หัตถกรรมท้องถิ่นเป็นภูมิปัญญาที่มีความสำคัญต่อการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์โดยอิงภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค	5.00	0.00	มากที่สุด
2. รูปภาพจะส่งผลต่อการรับรู้ได้จากการมองเห็นถึงโครงสร้าง รูปทรง วิธีการใช้ลายเส้นหรือลวดลายที่มีคุณลักษณะเฉพาะในอัตลักษณ์	5.00	0.00	มากที่สุด
3. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ มีผลต่อการออกแบบชุดอักษรกราฟิก	4.75	0.50	มากที่สุด
4. ภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของชาวภาคเหนือ จะเห็นได้จากตัวอักษรธรรม	5.00	0.00	มากที่สุด
5. การถ่ายทอดอัตลักษณ์ผ่านทางชุดอักษรกราฟิกทำให้เกิดประโยชน์ต่อการอนุรักษ์ภูมิปัญญา	4.75	0.50	มากที่สุด
6. ภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของแต่ละภูมิภาคจะมีความแตกต่างกัน	5.00	0.00	มากที่สุด
7. องค์ประกอบศิลป์จะมีความสำคัญต่อการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์โดยอิงภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค	4.75	0.50	มากที่สุด
8. สถาปัตยกรรมท้องถิ่นมีผลต่อความเป็นอัตลักษณ์และวัฒนธรรมของแต่ละภูมิภาค	4.75	0.50	มากที่สุด
9. สถาปัตยกรรมกระบวนการฯ ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น มีความคิดสร้างสรรค์แปลกใหม่ เหมาะสมต่อการนำไปใช้	5.00	0.00	มากที่สุด
10. สถาปัตยกรรมกระบวนการฯ ช่วยให้การออกแบบชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์มีความสวยงาม น่าสนใจบนสื่อโฆษณา	4.75	0.50	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	4.85	0.27	มากที่สุด

จากตารางที่ 1 ข้อความการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อสถาปัตยกรรมกระบวนการฯ นั้น ในภาพรวมพบว่า มีค่าเฉลี่ยโดยรวมความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.85$, S.D. = 0.27) แต่เมื่อพิจารณารายละเอียดพบว่า ประเด็นคำถามข้อที่ (1) หัตถกรรมท้องถิ่นเป็นภูมิปัญญาที่มีความสำคัญต่อการออกแบบสถาปัตยกรรมกระบวนการสำหรับพัฒนาชุดอักษรกราฟิกเชิงประยุกต์โดยอิงภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทยใน 4 ภูมิภาค, ข้อที่ (2) รูปภาพจะส่งผลต่อการรับรู้ได้จากการมองเห็นถึงโครงสร้าง รูปทรง วิธีการใช้ลายเส้นหรือลวดลายที่มีคุณลักษณะเฉพาะในอัตลักษณ์, ข้อที่ (4) ภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของชาวภาคเหนือ จะเห็นได้จากตัวอักษรธรรม, ข้อที่ (6) ภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของแต่ละภูมิภาคจะมีความแตกต่างกัน และข้อที่ (9) สถาปัตยกรรมกระบวนการฯ นั้น ผู้เชี่ยวชาญมีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยมากที่สุด ($\bar{X} = 5.0$, S.D. = 0.00)

5.3.2 การเทรนโมเดล

ผลการเทรนโมเดล Neural Network ระยะเวลาในการเทรนขึ้นอยู่กับจำนวนรายการและ Feature ของข้อมูล รวมทั้งโครงสร้างเลเยอร์ เช่นจำนวนเลเยอร์และจำนวนนิวรอน โดยในการวิจัยนี้ใช้ TensorFlow เข้ามาช่วยและสามารถแสดงความก้าวหน้าของการเทรนแต่ละรอบ (Epoch) เป็น Progress Bar และเวลาที่ใช้เพื่อให้เราสามารถประเมินระยะเวลาในการทำงาน สามารถแสดงดังรูปที่ 8

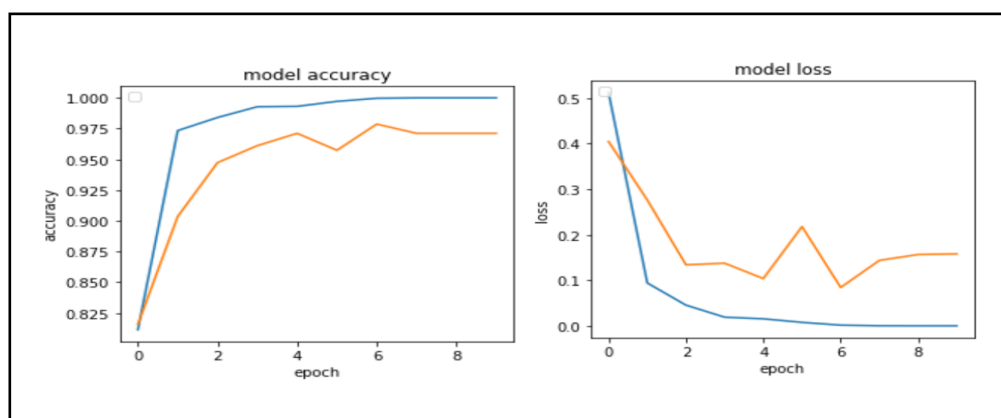
```
history = model.fit(x_train, y_train, batch_size=batch_size, epochs=epochs, validation_data=(x_test, y_test))
```

```
Epoch 1/10
50/50 [=====] - 25s 436ms/step - loss: 0.7227 - accuracy: 0.9494 - val_loss: 1.4843e-04 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 2/10
50/50 [=====] - 18s 360ms/step - loss: 0.0019 - accuracy: 0.9994 - val_loss: 0.0027 - val_accuracy: 0.9975
Epoch 3/10
50/50 [=====] - 18s 358ms/step - loss: 4.0785e-04 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0018 - val_accuracy: 0.9975
Epoch 4/10
50/50 [=====] - 18s 361ms/step - loss: 4.7096e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0011 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 5/10
50/50 [=====] - 18s 359ms/step - loss: 3.9047e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0011 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 6/10
50/50 [=====] - 18s 359ms/step - loss: 3.6479e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0010 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 7/10
50/50 [=====] - 19s 377ms/step - loss: 3.4193e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0010 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 8/10
50/50 [=====] - 18s 359ms/step - loss: 3.1979e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0010 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 9/10
50/50 [=====] - 18s 361ms/step - loss: 2.9985e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 0.0010 - val_accuracy: 1.0000
Epoch 10/10
50/50 [=====] - 18s 358ms/step - loss: 2.8145e-06 - accuracy: 1.0000 - val_loss: 9.9945e-04 - val_accuracy: 1.0000
```

รูปที่ 8 แสดงการเทรนโมเดล

5.3.3 การวัดค่าความแม่นยำของโมเดล

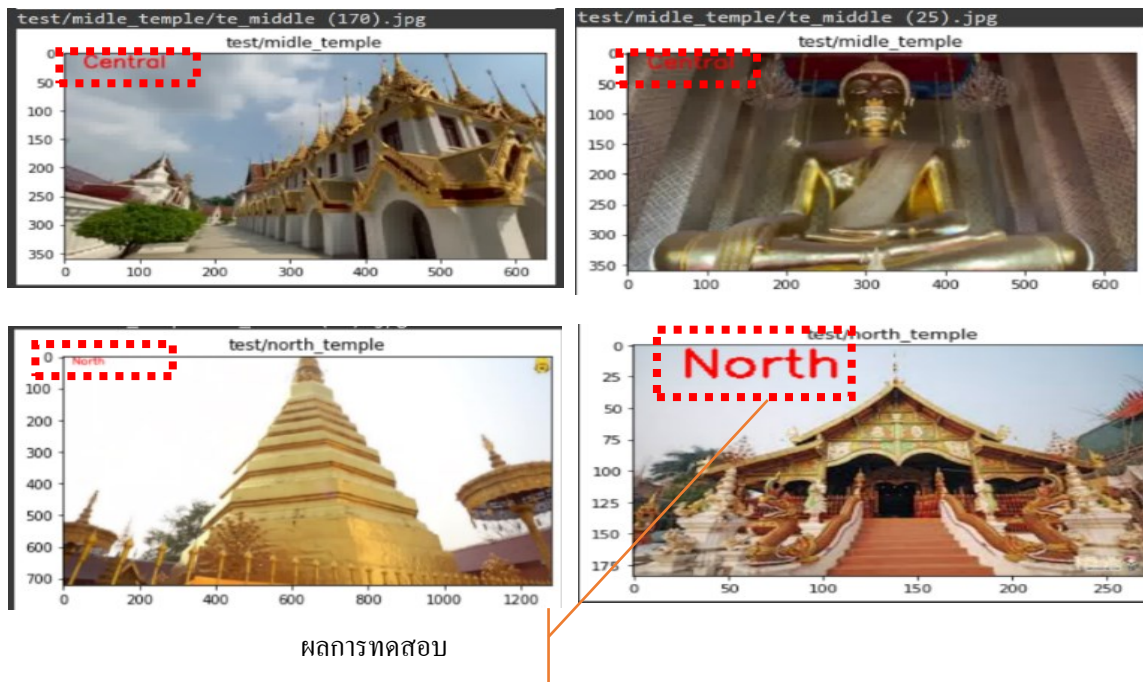
ผลการวัดค่าความแม่นยำของโมเดลสามารถนำเสนอความก้าวหน้าของการฝึกโมเดลในรูปแบบของกราฟได้ โดยการใช้ Matplotlib เพื่อแสดงค่าของการเทรนโมเดลในแต่ละรอบได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่า Model Accuracy และค่า Model Loss

5.3.4 ทดสอบความถูกต้อง

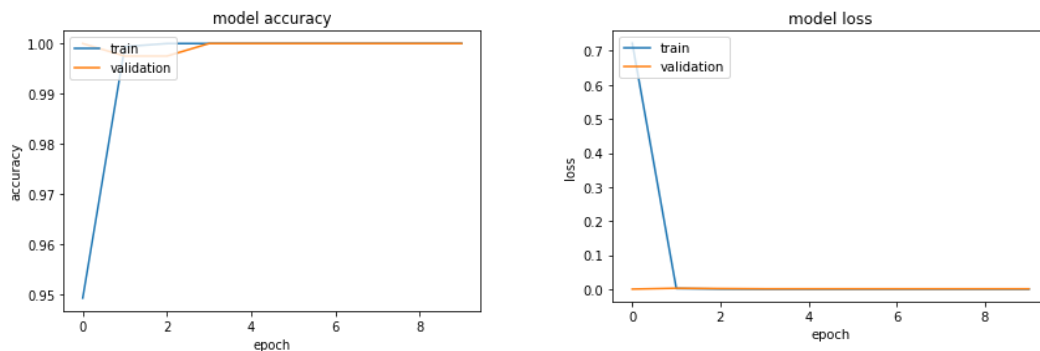
ผลการทดสอบความถูกต้องของรูปผู้วิจัยนำโมเดลที่ได้สร้างขึ้นมาทดสอบกับข้อมูลชุดทดสอบ โดยผลการทำนายจะแสดงข้อความบนรูปภาพ จากตัวอย่างแสดงผลการทำนายด้วยข้อความบนรูปภาพที่จัดไว้สำหรับเป็นข้อมูลทดสอบซึ่งเป็นรูปภาพของภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทย ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบรูปจากชุดข้อมูลทดสอบ [13]

5.3.5 การทำงานร่วมกับโมเดลสำเร็จรูป

ในขั้นตอนลำดับนี้เป็นการเทรนโมเดลซ้ำขึ้นใหม่เพื่อช่วยลดเวลาการเทรนโมเดล Deep Learning ด้วยการนำบางส่วนของโมเดลที่เทรนเรียบร้อยแล้วโดยใช้เทคนิค Transfer Learning with MobilenetV2 ผลการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 11

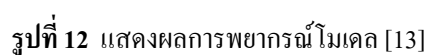


รูปที่ 11 แสดงผลการใช้เทคนิค Transfer Learning ร่วมกับโมเดล MobilenetV2

จากรูปที่ 10 ผลการใช้เทคนิค Transfer Learning ร่วมกับโมเดลสำเร็จรูป MobilenetV2 เพื่อช่วยให้การเทรนโมเดลรวดเร็ว ลดเวลาการเทรนด้วยการนำบางส่วนของโมเดลที่เทรนเรียบร้อยแล้ว กับงานที่ใกล้เคียงกัน มาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโมเดลใหม่

5.3.6 การพยากรณ์โมเดล

ผลการพยากรณ์โมเดลเป็นการเปรียบเทียบภาพจริงกับค่าที่พยากรณ์ จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ ข้อผิดพลาดของโมเดลได้ว่าเป็นอย่างไร เกิดจากสาเหตุอะไรนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



1) ชุดตัวอักษร ภาควะวันออกเฉียงเหนือ (อีสาน) แสดงดังรูปที่ 13

รูปที่ 13 ชุดตัวอักษรภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงกับคำตาจากภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปอักษรไทย

2) ชุดตัวอักษร ภาคใต้แสดงดังรูปที่ 14

ก	ข	ช	ค	ต	ผ	ง	จ	ฉ	ซ	ฌ	ญ	ฎ	ฏ	ฐ	ฑ	ฒ
ณ	ด	ต	ถ	ท	ธ	น	บ	ป	ผ	ฝ	พ	ฟ	ภ	ม	ย	ร
ล	ฬ	อ	ฮ	ศ	ษ	ห	ฬ	อ	ฮ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ	ุ
เ	อ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ	ุ	เ	อ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ
๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๐	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗

รูปที่ 14 ชุดตัวอักษรภาคใต้ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงบิกดาตา
จากภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทย

3) ชุดตัวอักษรภาคกลางแสดงดังรูปที่ 15

ก	ข	ช	ค	ต	ผ	ง	จ	ฉ	ซ	ฌ	ญ	ฎ	ฏ	ฐ	ฑ	ฒ
ณ	ด	ต	ถ	ท	ธ	น	บ	ป	ผ	ฝ	พ	ฟ	ภ	ม	ย	ร
ล	ฬ	อ	ฮ	ศ	ษ	ห	ฬ	อ	ฮ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ	ุ
เ	อ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ	ุ	เ	อ	ะ	ั	ำ	ิ	ี	ึ
๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๐	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗

รูปที่ 15 ชุดตัวอักษรภาคกลางด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยอิงบิกดาตา
จากภูมิปัญญาและอัตลักษณ์ของศิลปะอักษรไทย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jana W, & Patrick M, Machine learning for image-based species identification., *Methods in Ecology and Evolution*., wileyonlinelibrary.com/journal/mee3, 2216-2225.
- [2] Dong Y. & Liang G. (2019). Research and Discussion on Image Recognition and Classification Algorithm Based on Deep Learning., International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence, IEEE.
- [3] Mohammad A. (2021). Image-Based Detection Using Deep Learning and Google Colab. *International Journal of Academic Information Systems Research (IJASIR)*, 5(1): 30-35.
- [4] Alexei L. & Arnon S. (2015). Re-Designing Process Architectures Towards a Framework of Design Dimensions., International Conference on Research Challenges in Information Science Conference.
- [5] Boonchom S. & Prasong P. (2018). The Process Design and Development of the Image Resolution for Download on the Web Site., Proceeding of 2018 The 6th IEEE International Conference on Robotics, Informatics, and Intelligence control Technology (RIIT2018). Bangkok.
- [6] Sumeth S. & Phummipat D. (2022). Geographic Information System-Based Integrated Imagery Sensing System for Military Operations., *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 18(1).
- [7] Phummipat D. & Prasong P. (2022). The Application Development in Security and Privacy of QR Code Users Using Steganography Techniques for Efficient Communication in the Royal Air Force., *NKRAFA Journal of Science and Technology*, 18(1).
- [8] Kyu H. P, & Seung-H. S. (2011). A Facial Color Transition Model to Express Character Emotion. *IETE JOURNAL OF RESEARCH*, 57(2).
- [9] Zoph, B., Vasudevan, V., Shlens, J., & Le, Q. V. (2018). Learning transferable architectures for scalable image recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 8697-8710.
- [10] Yunfeng Z, Qinglan F, Fangxun B, Yifang L, & Caiming Z. (2018). Single-Image Super-Resolution Based on Rational Fractal Interpolation., *Transactions on Image Processing, IEEE*. 27(8): 3782-3797.
- [11] Parinya S. (2019). Machine Learning, Artificial Intelligence with Machine Learning AI, IDC Premier Co., Ltd. (in Thai)
- [12] <https://colab.research.google.com/>
- [13] <https://www.google.com/>

การสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า

Creating the Efficiency Measure Model of the Carbon Footprint in Warehouse Activities

^{1*}ชุตติเดช มั่นคงธรรม และ ^{2#}ชนิชา หมอยาดี

วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

^{1*}Chutidaj Munkongtum and ^{2#}Chanicha Moryadee

College of Logistics and Supply Chain, Suan Sunandha Rajabhat University

*S61484923018@ssru.ac.th, #Chanicha.mo@ssru.ac.th

Received : October 2, 2022

Revised : December 13, 2022

Accepted : December 20, 2022

บทคัดย่อ

แนวโน้มปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการพัฒนาเศรษฐกิจตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นในทุกภูมิภาคของโลก สิ่งสำคัญคือ การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากภาคอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งทั่วโลกได้พยายามแก้ปัญหาโดยการให้มีการแสดงข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร 10 กว่าปีที่ผ่านมาในด้านโลจิสติกส์เป็นที่สนใจและให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะด้วยที่จะต้องอาศัยการบริหารจัดการในการเชื่อมต่อระหว่างอุปสงค์และอุปทานทางด้านการค้าการลงทุน ในมุมหนึ่งการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมโลจิสติกส์ยังไม่มีระบบหรือรูปแบบเพื่อใช้ในการบริหารจัดการในส่วนนี้อย่างชัดเจน บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า ขั้นตอนการดำเนินการ ประกอบด้วย 1) การทบทวนวรรณกรรม 2) สร้างแบบสัมภาษณ์แบบเจาะลึก 3) สัมภาษณ์เชิงลึกผู้ที่เกี่ยวข้อง และ 4) วิเคราะห์ สังเคราะห์ผลการศึกษาเพื่อสร้างรูปแบบของกิจกรรมคลังสินค้า และสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า โดยใช้สูตรและวิธีการคำนวณจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก จากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 กิจกรรม คือ การรับ เก็บ การนำออก การเตรียมจัดส่ง และการส่ง โดยจำแนกการวัดออกเป็น 3 ประเภท คือ การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางตรง การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมจากการใช้พลังงาน และการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมอื่น ๆ และควรมีการศึกษากิจกรรมย่อย ๆ ของแต่ละกิจกรรมหลัก เพื่อจำแนกปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: รูปแบบการวัดประสิทธิภาพ, คาร์บอนฟุตพริ้นท์, กิจกรรมคลังสินค้า

Abstract

Trend of world's carbon footprint is likely to increase due to economic development since the Industrial Revolution. This makes the risk of climate change more trend severe in all regions of the world. The important is aspect the carbon footprint emissions from the manufacturing sector which around the world, they has tried to solve the problem by showing information "Carbon Footprint" organization. During the past 10 years in filed Logistics, they give a lot of attention according to the requirement of management team to connect between supply and demand in trade and investment. On the other hand, carbon footprint emissions from activities Logistics does not have a clear system or format to manage in this section. This article aims to present the efficiency model for measuring carbon footprint in warehouse activities. Action steps by reviewing the literature and related research to create a pattern in warehouse activities. Subsequently, it is used to design a model for measuring the efficiency of carbon footprint emissions in warehouse activities by using formulas and calculation methods from the Greenhouse Gas Management Organization. The results show that the main warehouse activities can be classified as 5 activities Receiving Storage Picking Shipping and Delivery. It will be measured divided into 3 scopes is Calculation of the organization's direct carbon footprint Calculation of Carbon Footprint from Energy Indirect Emissions Other Calculations of Indirect Carbon Footprint and the sub-activities of each main activity should be studied to clearly classify the amount of carbon footprint emissions.

Keywords: Efficiency measure model, Carbon Footprint, Warehouse Activities

1. บทนำ

แนวโน้มปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากการพัฒนาเศรษฐกิจตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นในทุกภูมิภาคของโลก เช่น อุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้น ปริมาณฝนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในฤดูน้ำหลากและน้อยลงในฤดูแล้ง และจำนวนวันที่อากาศร้อนเพิ่มขึ้น รวมถึงการเกิดเหตุการณ์รุนแรง เช่น คลื่นความร้อนความแห้งแล้ง น้ำท่วม พายุหมุน และไฟป่า ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจ สังคม และระบบนิเวศ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จากรายงานประเมินสถานการณ์ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ฉบับที่ 5 (The Fifth Assessment Report : AR5) ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) มีข้อค้นพบที่ชัดเจนว่าบทบาทและกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ จำนวนประชากร กิจกรรมด้านเศรษฐกิจ วิธีการดำเนินชีวิตการใช้พลังงาน การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน เทคโนโลยี และนโยบายด้านสภาพภูมิอากาศ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลกระทบจากการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ แนวทางการลดการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิโลกไม่ให้เพิ่มขึ้นมากกว่า 2 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรม [1]

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เริ่มต้นตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน จนกระทั่งถึงการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน โดยทำการคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ [1]

สาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน สิ่งหนึ่งที่สำคัญคือ การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากภาคอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งทั่วโลกได้พยายามแก้ปัญหาโดยการประชาสัมพันธ์ให้มีการแสดงข้อมูล “คาร์บอนฟุตพริ้นท์” (Carbon Footprint) บนผลิตภัณฑ์ในประเทศไทย การพัฒนาฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint Label) ดำเนินงานโดยองค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก ร่วมกับสถาบันสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการอนุมัติให้ขึ้นทะเบียนคาร์บอนฟุตพริ้นท์แล้ว 151 รายการ เช่น น้ำตาล ผงพลาสติกพีวีซี น้ำกะทิ น้ำมันถั่วเหลืองผลิตภัณฑ์กลุ่มเมอร์ราเบอร์ค ปูนซีเมนต์ เซรามิก ก้อนน้ำ หลอดไฟ เป็นต้น ประเทศไทยมีแนวโน้มการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพิ่มสูงขึ้น จากกิจกรรมการพัฒนาประเทศ ซึ่งจากข้อมูลการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในปี พ.ศ. 2554 มีปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ 305.52 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ และจากการคาดการณ์ปริมาณการปล่อยมีสูงถึง 555 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า ในปี พ.ศ. 2573 โดยภาคเศรษฐกิจที่มีสัดส่วนการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์มากที่สุดคือ ภาคพลังงาน รองลงมาคือ ภาคเกษตร กระบวนการทางอุตสาหกรรม และของเสีย [2] ประกอบกับการจัดลำดับขององค์กร Germanwatch ระบุว่าประเทศไทยเป็นประเทศ 1 ใน 10 ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว และการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของศูนย์ภูมิอากาศกรมอุตุนิยมวิทยา สรุปว่าในปี พ.ศ. 2565 - 2578 ประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการดำเนินการตามมาตรการระหว่างประเทศที่มุ่งสู่การเติบโตด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และการบูรณาการกับแนวทางการพัฒนาประเทศในระยะยาว การเตรียมความพร้อมด้านข้อมูล องค์ความรู้ และความตระหนักรู้ของประชาชน นอกจากนี้ประเทศไทยได้แสดงเจตจำนงในการมีส่วนร่วม (Nationally Determined Contribution: NDC) ซึ่งดำเนินการตามความตกลงปารีสในการจัดการปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยจัดทำข้อเสนอการมีส่วนร่วมของประเทศในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ การดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภายหลัง พ.ศ. 2563 ที่มีความสอดคล้องตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงและการพัฒนาที่ยั่งยืน ต่อขอการดำเนินงานในกรอบ NAMA และกำหนดเป้าหมายการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในปี พ.ศ. 2573 โดยกำหนดเป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ที่ร้อยละ 20 - 25 [2]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาพบว่า มีการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับปรากฏการณ์เรือนกระจก และเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก กิจกรรมด้านโลจิสติกส์ในซัพพลายเชนทั่วโลกกลายเป็นสาเหตุสำคัญของการปล่อยมลพิษทางอุตสาหกรรมและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่กำลังลุกลาม แม้ว่าการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกี่ยวข้องกับโลจิสติกส์จำนวนมากจะเกิดจากกระบวนการจัดเก็บ และการจัดการวัสดุในคลังสินค้า โดยการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเครือข่ายโลจิสติกส์ทั่วโลก มี 4 แหล่งที่มาหลัก ๆ ของการปล่อยมลพิษประกอบด้วย ดังนี้

- 1) การขนส่งในประเทศ: การปล่อยมลพิษจากการขนส่งทางถนน (เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง) ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายสินค้าในประเทศต้นทางหรือประเทศปลายทาง ระหว่างโรงงาน และท่าเรือต้นทางหรือปลายทาง
- 2) การขนส่งระหว่างประเทศ: การปล่อยมลพิษจากเรือเดินสมุทร (เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง) ระหว่างท่าเรือต้นทางและปลายทาง
- 3) การดำเนินงานคลังสินค้า: การปล่อยก๊าซจากการใช้ไฟฟ้าในการบำรุงรักษาสินค้ารวมถึงอุปกรณ์เครื่องทำความเย็น และกิจกรรมสนับสนุนอื่น ๆ
- 4) การดำเนินงานท่าเรือ: การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกิจกรรมท่าเรือทั้งหมดรวมถึงการใช้ไฟฟ้าและเชื้อเพลิงโดยสิ่งอำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ที่ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน

อย่างไรก็ตาม การวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบของการขนส่ง สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคลังสินค้ายังได้รับความสนใจเพียงเล็กน้อย [3] ดังนั้น การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ที่เกิดจากกิจกรรมคลังสินค้าในประเทศไทยมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานคลังสินค้าที่ชัดเจนที่สุดตัวหนึ่ง โดยเป็นการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทั้งทางตรง และทางอ้อม (Direct and Indirect Emissions) การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในคลังสินค้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระยะทาง พื้นที่ เอกสารที่ใช้ในการทำงาน และชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ภายในคลังสินค้า

รวมทั้งกิจกรรมโลจิสติกส์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันการคำนวณเพื่อตรวจสอบและรายงานผลการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยอ้างอิงจากหลักการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตาม European Standard CEN EN 16258 “Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)” เมื่อพิจารณาตลอดชีพหลายเซกชันของงานด้านคลังสินค้า ซึ่งรวมถึงการเก็บสินค้า การจัดเรียง และการขนถ่ายสินค้าด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมคลังสินค้าจึงมีการคำนวณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ จากการใช้เชื้อเพลิง พลังงานความร้อนและสารทำความเย็น จากกิจกรรมในแต่ละส่วนทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดชีพหลายเซกชันการดำเนินงาน คลังสินค้า [4]

อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตได้ว่าความสนใจในหัวข้อการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ใน โลจิสติกส์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งให้เห็นถึงความจำเป็นในการจัดการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในองค์กร หรือผู้ให้บริการ โลจิสติกส์ ดังนั้น ความพยายาม ในการจัดหมวดหมู่และตรวจสอบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ และแนวปฏิบัติด้านการจัดการ โลจิสติกส์ เพื่อเพิ่มเติมวรรณกรรมที่มีอยู่ และให้ข้อมูลเชิงลึกใหม่ ๆ [5] จากเหตุผลดังกล่าว และการทบทวนวรรณกรรม พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวัด การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ไปที่กิจกรรมการขนส่ง เนื่องจากปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเป็นปัญหาที่ศึกษากันในสาขา การวิจัยดำเนินงาน และการขนส่งและ โลจิสติกส์ โดยปัญหานี้ถือว่าเป็นปัญหาที่ยากและท้าทายสำหรับนักวิจัย และผู้ปฏิบัติงาน [6] และงานวิจัยส่วนหนึ่งก็มุ่งเน้นไปที่การวัดการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ไปที่ภาพรวมของ คลังสินค้า ซึ่งเห็นได้ว่ายังไม่มีงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า ซึ่งคือ เป้าหมายหลักของการวิจัยครั้งนี้ เพื่อสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพสำหรับใช้เป็นเครื่องมือในการวัด การควบคุม การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์กิจกรรมคลังสินค้า ตลอดจนเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการดำเนินการในกิจกรรม คลังสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการลดต้นทุนทางด้านโลจิสติกส์ และช่วยสร้างข้อได้เปรียบทางการแข่งขัน ในอนาคต

2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์คลังสินค้าตามเป้าหมาย เป็นการศึกษากิจกรรมภายในคลังสินค้าที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ [1] โดยแบ่งกิจกรรมที่มีการปล่อย คาร์บอนฟุตพริ้นท์ไว้ 3 ประเภท ได้แก่

2.1 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางตรง จากกิจกรรมต่างๆ ขององค์กรโดยตรง เช่น การเผาไหม้ของเครื่องจักร การใช้พาหนะขององค์กร (ที่องค์กรเป็นเจ้าของเอง) การใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสีย การรั่วซึม/รั่วไหล จากกระบวนการ หรือกิจกรรม เป็นต้น

2.2 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมจากการใช้พลังงาน ได้แก่ การซื้อพลังงานมาใช้ในองค์กร ได้แก่ พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน พลังงานไอน้ำ เป็นต้น

2.3 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมด้านอื่น ๆ การเดินทางของพนักงานด้วยพาหนะที่ไม่ใช่ขององค์กร การเดินทางไปสัมมนานอกสถานที่ การใช้วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น

ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมคลังสินค้าเพื่อนำไปสู่การค้นหาและสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพ การปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า

3. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint)

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วย ทุกช่วงในวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การประกอบชิ้นงาน การกระจายสินค้า การใช้งาน และการจัดการของเสียหลังหมดอายุการใช้งาน รวมถึงการขนส่งที่เกี่ยวข้อง โดยคำนวณออกมาในรูปของ กรัม กิโลกรัม หรือตัน คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [1]

โดยก๊าซควบคุมจากพิธีสารเกียวโต มีเพียง 7 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Greenhouse Gas Emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) และก๊าซไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (NF₃) ทั้งนี้ ยังมีก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ สารซีเอฟซี (CFC หรือ Chlorofluorocarbon) ซึ่งใช้เป็นสารทำความเย็นและใช้ในการผลิตโฟม แต่ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในพิธีสารมอนทรีออล [1]

3.2 แนวคิด และทฤษฎีเกี่ยวกับกิจกรรมคลังสินค้า

พัฒนาการการจัดการคลังสินค้า การจัดเก็บสินค้าเป็นกิจกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งทางเศรษฐกิจในสมัยก่อน แต่ละครอบครัวต่างช่วยเหลือตัวเองในการแสวงหาอาหารและปัจจัย 4 เพื่อเก็บรักษาไว้สำหรับในยามจำเป็น เช่น ในสมัยโบราณมีการเก็บรักษาอาหารไว้ในห้องเก็บของใต้ดิน เพื่อป้องกันมิให้อาหารเน่าเปื่อยได้ ต่อมาเมื่อระบบการขนส่งคล่องตัวขึ้น การเก็บรักษาสินค้าจึงได้พัฒนาการเก็บในครัวเรือนไปเป็นการเก็บรักษาของผู้ค้าปลีก ผู้ค้าส่ง และผู้ผลิต จากสภาพทางการตลาดได้ชี้ให้เห็นว่าคลังสินค้าได้เริ่มกำหนดขึ้นมาเป็นหน่วยงานเก็บรักษาสินค้าสนับสนุนกระบวนการตลาดเพื่อให้บรรลุเป้าหมายการเก็บรักษาสินค้าในการตอบสนองอุปสงค์ในตลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบที่ไม่แน่นอน แม้ว่ากิจกรรมของคลังสินค้าอาจมีความแตกต่างกัน แต่ก็มีกำหนดไว้ว่า การรับ การเก็บ การนำออก การจัดส่ง และการส่ง [15] ดังนั้นคลังสินค้าจึงเป็นสถานที่เก็บรักษาสินค้าไว้จนกว่าจะมีการจัดจำหน่ายออกไปเพื่อสนองความต้องการของผู้ใช้

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คลังสินค้ามีส่วนสำคัญในการเพิ่มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในซัพพลายเชน ดังนั้น จึงทำให้การวิจัยเชิงวิชาการเกี่ยวกับคลังสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน ได้เติบโตขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา [7]

ความต้องการผลิตภัณฑ์และการบริโภคที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ได้สร้างแรงกดดันต่อผลผลิตภาคอุตสาหกรรมและซัพพลายเชน และความต้องการดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม อัตราการเพิ่มขึ้นของมลพิษและภัยพิบัติด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตภาคอุตสาหกรรมได้กระตุ้นให้นักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ภายในบริบทของการจัดการซัพพลายเชนที่ยั่งยืน (Sustainable Supply Chain Management : SSCM) [8]

มีการวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของซัพพลายเชน แต่ส่วนใหญ่เน้นที่องค์ประกอบด้านการขนส่ง โดยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคลังสินค้าได้รับความสนใจค่อนข้างน้อย [9]

คลังสินค้าเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกขนาดใหญ่ และผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอยู่ภายใต้การมุ่งเน้นที่เพิ่มขึ้น แต่ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าบริษัทลดการปล่อยคาร์บอนลงร้อยละ 36 [10] โดยอิงตามรายได้ปกติระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2557 แต่ประสบความสำเร็จค่อนข้างต่ำกว่าในตลาดเกิดใหม่เมื่อเทียบกับตลาดอิมตัว

การจัดการคลังสินค้าสีเขียวมีส่วนสำคัญในการพัฒนาซัพพลายเชนที่มีประสิทธิภาพคาร์บอน การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการตัดสินใจจัดการคลังสินค้าภายใต้นโยบายการปล่อยมลพิษแบบ Cap-and-Trade และบทบาทของการลงทุนด้านเทคโนโลยีสีเขียวในการจัดการการแลกเปลี่ยนระหว่างประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของการดำเนินงานคลังสินค้า

จะช่วยให้การตัดสินใจที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการคลังสินค้าและการลงทุนด้านเทคโนโลยี ภายใต้นโยบายการปล่อยมลพิษจากการค้า เพื่อช่วยผู้ปฏิบัติงานในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ [11]

การออกแบบอาคารคลังสินค้าเพื่อจัดการกับปัญหาทางอุตสาหกรรม การออกแบบอาคารคลังสินค้าเพื่อลดเวลาของวงจร ต้นทุนรวม และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบจัดเก็บข้อมูลตลอดอายุการใช้งาน เป้าหมายคือ การกำหนดมิติของอาคารโดยรวม [12]

การใช้พลังงานของคลังสินค้าและกระจายสินค้าได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของคลังสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการวิจัยเกี่ยวกับการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในซัพพลายเชน [13]

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารและการพัฒนาที่ยั่งยืนเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญมากขึ้นในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา มีบริษัทให้ความสนใจกับคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมขององค์กรมากขึ้น และกำลังมองหาวิธีการที่จะปรับปรุงบริการหรือผลิตภัณฑ์ขององค์กรให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [14]

เนื่องจากซัพพลายเชนมีความซับซ้อนมากขึ้น ตัวชี้วัดและเครื่องมือที่หลากหลายในการวัดประสิทธิภาพของคลังสินค้าก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ตัวชี้วัดที่ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพจะได้รับการประเมินในลักษณะที่แตกต่างกัน [15]

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การทบทวนวรรณกรรม

ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี เอกสารทางวิชาการ บทความ วารสาร รายงานการวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมคลังสินค้า สร้างแบบสัมภาษณ์แบบเจาะลึก (In-Depth Interview) สัมภาษณ์เชิงลึกผู้ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมคลังสินค้า วิเคราะห์สังเคราะห์ผลการศึกษาเพื่อสร้างรูปแบบของกิจกรรมคลังสินค้าและสร้างรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้าโดยใช้สูตรและวิธีการคำนวณจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก

4.2 การวิเคราะห์

การคำนวณการหาปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจก ด้วยวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกขององค์กรประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

- 4.1 การระบุแหล่งปล่อยและแหล่งดูดกลับก๊าซเรือนกระจก
- 4.2 การคัดเลือกวิธีการคำนวณ
- 4.3 การคัดเลือกหรือพัฒนาค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- 4.4 การคำนวณปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจก
- 4.5 บัญชีรายการก๊าซเรือนกระจกปีฐาน (รูปที่ 1)

โดยใช้ข้อมูลกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในองค์กรคูณกับค่าการปล่อย (รูปที่ 1) หรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก และแสดงผลให้อยู่ในรูปของมวล (ตันหรือกิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂e) มีสูตร ดังนี้

$$Z = a \times b \quad (1)$$

โดยที่ Z = ปริมาณก๊าซเรือนกระจก

a = ข้อมูลกิจกรรม

b = ค่าการปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก (ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) เทียบกับ CO₂)

ตัวอย่าง: บริษัท A ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1,500 kgCO₂ สักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) เท่ากับ 1

$$= 1,500 \times 1 = 1,500 \text{ kgCO}_2$$

สามารถใช้งานได้ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป และเริ่มบังคับใช้ 1 เมษายน 2565						UPDATE: เมษายน 2565	
ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) รวบรวมมาจากข้อมูลหัตถภูมิ สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร							
ชื่อ	Units	EMISSION FACTORS				แหล่งอ้างอิงข้อมูล	
		CO ₂ [kgCO ₂ /unit]	CH ₄ [kgCH ₄ /unit]	N ₂ O [kgN ₂ O/unit]	Total [kgCO ₂ eq/unit]		
Stationary Combustion							
1	Natural gas	scf	5.72E-02	1.02E-06	1.02E-07	0.0573	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
2	Natural gas	MJ	5.61E-02	1.00E-06	1.00E-07	0.0562	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
3	Lignite	kg	1.06E+00	1.05E-05	1.57E-05	1.0619	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
4	Fuel oil A	litre	3.21E+00	1.24E-04	2.49E-05	3.2200	IPCC Vol.2 table 2.2, PTT
5	Fuel oil C	litre	3.24E+00	1.25E-04	2.51E-05	3.2457	IPCC Vol.2 table 2.2, PTT
6	Gas/Diesel oil	litre	2.70E+00	1.09E-04	2.19E-05	2.7078	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
7	Anthracite	kg	3.09E+00	3.14E-05	4.71E-05	3.1000	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
8	Sub-bituminous coal	kg	2.53E+00	2.64E-05	3.96E-05	2.5454	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
9	Jet Kerosene	litre	2.47E+00	1.04E-04	2.07E-05	2.4775	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
10	LPG	litre	1.68E+00	2.66E-05	2.66E-06	1.6812	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
11	LPG	kg	3.11E+00	4.93E-05	4.93E-06	3.1134	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE LPG 1 litre = 0.54 kg
12	Motor gasoline	litre	2.18E+00	9.44E-05	1.89E-05	2.1894	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
13	FUEL WOOD	kg		4.80E-04	6.40E-05	0.0304	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
14	Bagasse	kg		2.26E-04	3.01E-05	0.0143	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
15	Palm kernel shell	kg		5.56E-04	7.41E-05	0.0352	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
16	Cob	kg		5.03E-04	6.71E-05	0.0319	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
17	Biogas	m3		2.09E-05	2.09E-06	0.0011	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
18	FUEL WOOD (CO2only)	kg	1.79E+00			1.7909	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
19	Bagasse (CO2only)	kg	7.53E-01			0.7530	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
20	Palm kernel shell (CO2only)	kg	1.85E+00			1.8530	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
21	Cob (CO2only)	kg	1.68E+00			1.6780	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
22	Biogas (CO2only)	m3	1.14E+00			1.1428	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
Mobile Combustion (On road)							
23	Motor Gasoline - uncontrolled	litre	2.18E+00	1.04E-03	1.01E-04	2.2394	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
24	Motor Gasoline - oxydation catalyst	litre	2.18E+00	7.87E-04	2.52E-04	2.2719	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
25	Motor Gasoline - low mileage light duty vehicle vintage 1995 or later	litre	2.18E+00	1.20E-04	1.79E-04	2.2327	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
26	Gas/ Diesel Oil	litre	2.70E+00	1.42E-04	1.42E-04	2.7406	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE

ชื่อ	Units	EMISSION FACTORS				แหล่งอ้างอิงข้อมูล
		CO ₂ [kgCO ₂ /unit]	CH ₄ [kgCH ₄ /unit]	N ₂ O [kgN ₂ O/unit]	Total [kgCO ₂ eq/unit]	
27 Compressed Natural Gas	kg	2.13E+00	3.49E-03	1.14E-04	2.2609	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, PTT
28 Liquefied Petroleum Gas	litre	1.68E+00	1.65E-03	5.32E-06	1.7306	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
29 Liquefied Petroleum Gas	kg	3.11E+00	3.06E-03	9.86E-06	3.2049	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE LPG 1 litre = 0.54 kg
Mobile Combustion (Off road)						
Diesel						
30 - Agriculture	litre	2.70E+00	1.51E-04	1.04E-03	2.9793	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
31 - Forestry	litre	2.70E+00	1.51E-04	1.04E-03	2.9793	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
32 - Industry	litre	2.70E+00	1.51E-04	1.04E-03	2.9793	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
33 - Household	litre	2.70E+00	1.51E-04	1.04E-03	2.9793	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
Motor Gasoline - 4 stroke						
34 - Agriculture	litre	2.18E+00	2.52E-03	6.30E-05	2.2738	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
35 - Forestry	litre	2.18E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.1816	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
36 - Industry	litre	2.18E+00	1.57E-03	6.30E-05	2.2455	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
37 - Household	litre	2.18E+00	3.78E-03	6.30E-05	2.3116	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
Motor Gasoline - 2 stroke						
38 - Agriculture	litre	2.18E+00	4.41E-03	1.26E-05	2.3171	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
39 - Forestry	litre	2.18E+00	5.35E-03	1.26E-05	2.3454	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
40 - Industry	litre	2.18E+00	4.09E-03	1.26E-05	2.3077	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
41 - Household	litre	2.18E+00	5.67E-03	1.26E-05	2.3549	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
Electricity, grid mix (ไฟฟ้า)						
42 ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016-2018; LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03	kWh	0.4954	6.10E-05	1.04E-05	0.4999	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA, AR5 (with TGO electricity 2016-2018)
Refrigerants (สารทำความเย็น)						
43 R-22 (HCFC-22)	kg	-	-	-	1,760.0000	IPCC 2013, AR5
44 R-32	kg	-	-	-	677.0000	IPCC 2013, AR5
45 R-125	kg	-	-	-	3,170.0000	IPCC 2013, AR5
46 R-134	kg	-	-	-	1,120.0000	IPCC 2013, AR5
47 R-134a	kg	-	-	-	1,300.0000	IPCC 2013, AR5
48 R-143	kg	-	-	-	328.0000	IPCC 2013, AR5
49 R-143a	kg	-	-	-	4,800.0000	IPCC 2013, AR5

ทั้งนี้ สำหรับ Emission Factor ใน Scope 3 สามารถค้นหาได้ที่ <http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlxcGMzTnBiMIQ9>

รูปที่ 1 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) [1]

จากรูปที่ 1 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) เป็นค่าที่แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย โดยจะขึ้นอยู่กับกิจกรรมและเทคโนโลยีของแหล่งปล่อยก๊าซในแต่ละประเทศ อาจมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามเงื่อนไขเฉพาะของกิจกรรมนั้น ๆ เรียกว่า ค่าการปล่อยเฉพาะของประเทศ (Country Specific Emission Factor) ซึ่งได้มาจากการตรวจวัดจริงหรือการทดลอง ในกรณีที่บางประเทศไม่มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) สามารถอ้างอิงได้จาก 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

4.3 การออกแบบ

จากการสังเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี เอกสารทางวิชาการ บทความ วารสาร รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมคลังสินค้า และสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) ผู้ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมคลังสินค้า จนสามารถออกแบบรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้าได้เป็น 5 กิจกรรม คือ การรับ การเก็บ การนำออก การจัดส่ง และการส่ง

5. ผลการวิจัย

จากการศึกษา จึงทำให้สามารถกำหนดร่างรูปแบบแนวทางการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมการปฏิบัติงานในคลังสินค้าที่จะสามารถนำไปใช้เป็นรูปแบบในการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้าของทุก ๆ คลังสินค้าได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้า

	SCOPE	รายละเอียด	หน่วย	ปริมาณต่อปี	EF	หน่วย	CF	หน่วย
1.Receiving	SCOPE 1							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
	SCOPE 2							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
2.Storage	SCOPE 3							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
	SCOPE 1							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
3.Picking	SCOPE 2							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
	SCOPE 3							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
4.Shipping	SCOPE 1							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
	SCOPE 2							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
5.Delivery	SCOPE 3							tCO ₂ e
								tCO ₂ e
	SCOPE 1							tCO ₂ e
								tCO ₂ e

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า กิจกรรมในคลังสินค้าแบ่งออกเป็น 5 กิจกรรม ดังนี้ การรับ เก็บ การนำออก การจัดส่ง และการส่ง โดยในการวัดการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในแต่ละกิจกรรมจำเป็นจะต้องจำแนกวัดออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางตรง 2) การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมจากการใช้พลังงาน และ 3) การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทางอ้อมอื่น ๆ เพื่อให้ทราบถึงแหล่งการเกิด และแหล่งการปล่อยอย่างถูกต้อง เพื่อให้สามารถวางแผนในการบริหารจัดการการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ

7. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากกิจกรรมในคลังสินค้าสามารถแบ่งเป็นกิจกรรมหลัก และกิจกรรมสนับสนุนหรือกิจกรรมย่อย ๆ ดังนั้น การที่จะนำรูปแบบการวัดประสิทธิภาพการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมคลังสินค้านี้ไปใช้ ควรมีการศึกษากิจกรรมย่อย ๆ ของแต่ละกิจกรรมหลัก เพื่อให้สามารถจำแนกได้ว่าปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในกิจกรรมหลักของคลังสินค้าใดเป็นสาเหตุที่แท้จริง เพื่อที่จะนำไปกำหนดเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในคลังสินค้าต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยปริญญาเอก สาขาวิชาการจัดการ โลจิสติกส์และซัพพลายเชน วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา พร้อมทั้งได้รับคำแนะนำจาก ผศ.ดร.ชนิชา หมอชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำหรับคำปรึกษาด้านต่าง ๆ สำหรับการศึกษาและวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2565). แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. สืบค้น 10 กันยายน 2565, จาก <http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2565). รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม. สืบค้น 10 กันยายน 2565, จาก <http://www.onep.go.th/>
- [3] Ries, J. M., Grosse, E. H., & Fichtinger, J. (2017). Environmental impact of warehousing: A scenario analysis for the United States. *International Journal of Production Research*. Retrieved on September 10, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/304798587_Environmental_impact_of_warehousing_A_scenario_analysis_for_the_United_States
- [4] จิตลดา หมาข่ม และคณะ. (2560). คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 11(1): 57-66.
- [5] David Martin Herold & Ki-Hoon Lee. (2017). Carbon management in the logistics and transportation sector: an overview and new research directions. Retrieved on September 12, 2022, from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17583004.2017.1283923>
- [6] เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ. (2018). ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปสงค์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียานเรืออากาศ, ปีที่ 13: 19-24. สืบค้น 12 กันยายน 2565, จาก <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/141988>
- [7] Maicol Bartolini, Eleonora Bottani, Eric H. Grosse. (2019). Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*. Volume 226: 242-258. Retrieved on September 12, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/332267753_Green_warehousing_Systematic_literature_review_and_bibliometric_analysis
- [8] Rajeev, A., Rupesh, K.Pati., Sidhartha, S.Padhi. & Kannan Govindan. (2017). Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production*. Volume 162. Retrieved on September 12, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617309514?via%3Dihub>

- [9] Johannes Fichtinger, Jörg M. Ries, Eric H. Grosse & Peter Baker, (2015). Assessing the environmental impact of integrated inventory and warehouse management. *International Journal of Production Economics, Elsevier*. Volume 170: 717-729. Retrieved on September 12, 2022, from <https://ideas.repec.org/a/eee/proeco/v170y2015ipcp717-729.html>
- [10] Shao Hung Goh. (2019). Barriers to Low-Carbon Warehousing and the Link to Carbon Abatement: A Case from Emerging Asia. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. Volume 49. Retrieved on September 15, 2022, from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJPDLM-10-2018-0354/full/html>
- [11] Xu Chen, Xiaojun Wang, Vikas Kumar, Niraj Kumar. (2016). Low carbon warehouse management under cap-and-trade policy. *Journal of Cleaner Production*. Volume 139. Retrieved on September 15, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616312379?via%3Dihub>
- [12] Accorsi, R., Bortolini, M., Gamberi, M., Manzini, R. & Pilati, F. (2017). Multi-objective warehouse building design to optimize the cycle time, total cost, and carbon footprint. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume 92. Retrieved on September 15, 2022, from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0157-9>
- [13] Lewczuk, K., Klodawski, M. & Gepner, P. (2021). Energies. Retrieved on September 15, 2022, from <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2709>
- [14] Lilyana Mihova. (2020). FIELDS OF APPLICATION OF ENERGY EFFICIENT WAREHOUSE PRACTICES. *Knowledge International Journal*. Retrieved on September 18, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/344339648_FIELDS_OF_APPLICATION_OF_ENERGY_EFFICIENT_WAREHOUSE_PRACTICES
- [15] Francielly Hedler Staudt, Alpan, G., Di Mascolo, M. & Rodriguez, C. (2015). Warehouse performance measurement: a literature review. *International Journal of Production Research, Taylor & Francis Journals*. Volume 53(18). Retrieved on September 18, 2022, from <https://ideas.repec.org/a/taf/tprsx/v53y2015i18p5524-5544.html>

การพยากรณ์ยอดขาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลัง กรณีศึกษาธุรกิจค้ามูลไก่ Sales Forecasting to Optimize Inventory: A Case Study of Chicken Manure Business

^{1*}นิสาชล ภูมิพงศ์ไทย และ ^{2#}สราวุธ ลักษณะโต

^{1,2}คณะโลจิสติกส์ สาขาวิชาการจัดการ โลจิสติกส์และโซ่อุปทาน มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

^{1*}Nisachon Poompongthai and ^{2#}Sarawut Luksanato

^{1,2}Faculty of Logistics, Logistics and Supply Chain Management, Burapha University, Chonburi 20131

*63920156@go.buu.ac.th, #tooninkorea@gmail.com

บทคัดย่อ

วิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการพยากรณ์ยอดขายปุ๋ยมูลไก่ที่เหมาะสม ในการนำไปปรับใช้กับการตอบสนองความต้องการของลูกค้าและศึกษาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม สำหรับการจัดการสินค้าคงคลังให้มีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลยอดขายของปุ๋ยมูลไก่ตั้งแต่ มกราคม พ.ศ. 2561 – ธันวาคม พ.ศ. 2563 มาพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าด้วยเทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา ทั้งหมด 4 วิธี และพิจารณาความแม่นยำของวิธีการพยากรณ์แบบต่าง ๆ ด้วยการวัดค่าความคลาดเคลื่อน จากผลการศึกษาพบว่า การพยากรณ์วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้มมีความเหมาะสมในการนำไปหาค่าการพยากรณ์ความต้องการสินค้า ปี พ.ศ. 2564 โดยมีผลลัพธ์ทั้งหมด 53,280 กระสอบต่อปี ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม เท่ากับ 3,384 กระสอบต่อครั้ง

คำสำคัญ: ปุ๋ยมูลไก่, การพยากรณ์, อุปสงค์, สินค้าคงคลัง

Received : October 10, 2022

Revised : December 21, 2022

Accepted : December 22, 2022

Abstract

This research aims to study an appropriate sales forecasting model. To be adapted to meet the needs of customers in a timely manner and to study the appropriate order quantity for effective inventory management. With regard to data collection, this research uses the sales volume of chicken manure during January 2018 and December 2020, to forecast customer demand using four time series techniques. Afterward, the accuracy of each forecast technique is evaluated and compared using forecast error methods. According to the analytic results, it is found that the seasonal-index-ratio-to-trend method is suitable for demand forecasting in 2021, with a result of 53,280 sacks per year. By using the appropriate model, the Economic Order Quantity is subsequently calculated as 3,384 sacks per time.

Keywords: Chicken Manure, Forecasting, Demand, Inventory

1. บทนำ

จังหวัดเพชรบูรณ์ มีตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย มีลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบลุ่มแบบท้องกระทะ ประกอบด้วยเนินเขา ป่า และที่ราบสลับกันไป จึงทำให้อากาศร้อนจัดในฤดูร้อน หนาวจัดในฤดูหนาว มีแม่น้ำป่าสักเป็นแม่น้ำสายสำคัญ ทำให้มีทรัพยากรธรรมชาติมากมาย ดินอุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การเพาะปลูกพืชทำการเกษตร [1] จากข้อมูลการใช้ที่ดินจังหวัดเพชรบูรณ์ ปี พ.ศ. 2563 จังหวัดเพชรบูรณ์มีพื้นที่ทั้งสิ้น 7,747,383 ไร่ แบ่งพื้นที่ถือครองทางการเกษตร 4,481,747 ไร่ โดยพื้นที่ทำการเกษตรแบ่งออกเป็น ข้าว พืชไร่ พืชผัก สมุนไพร และการเกษตรอื่น ๆ [2]

จากการศึกษาการใช้ปุ๋ยของเกษตรกรจังหวัดเพชรบูรณ์ พบว่ามีการใช้ปุ๋ยที่ไม่ถูกต้อง โดยการใช้ปุ๋ยเคมีเกินความจำเป็นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพืช การเสื่อมสภาพของหน้าดินและต้นทุนที่สูงขึ้น จังหวัดเพชรบูรณ์จึงมีการฝึกอบรม ส่งเสริมและพัฒนาการเกษตร โดยหันมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมี เพื่อปรับโครงสร้างดิน และลดต้นทุนการทำการเกษตร [3]

ดังนั้น หจก.ช.มยุรี จำกัด ซึ่งเป็นผู้ประกอบการค้าขายปุ๋ยอินทรีย์ ประเภทมูลไก่ จึงประสบปัญหาการวางแผนการสั่งซื้อ เนื่องจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการทำการเกษตร เป็นแบบฤดูกาล ผลกระทบที่เกิดขึ้นทำให้ช่วงฤดูกาลทำการเกษตรมีปริมาณความต้องการซื้อสินค้าจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถจัดหาสินค้าได้เพียงพอและทันเวลา แต่ในทางกลับกันช่วงที่ไม่ใช่ฤดูกาลทำการเกษตร ปริมาณความต้องการซื้อสินค้าลดลง ทำให้สินค้าคงคลังเหลือจำนวนมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพการจัดการสินค้าคงคลังลดลง ซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหาข้างต้น สามารถแก้ไขด้วยการพยากรณ์ทางสถิติแบบเทคนิคอนุกรมเวลา และปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม วิธีดังกล่าวสามารถทำให้ หจก.ช.มยุรี จำกัด ทราบค่าพยากรณ์ปริมาณความต้องการสินค้าในอนาคต และสามารถบริหารจัดการปริมาณการสั่งซื้อสินค้าที่เหมาะสมในแต่ละครั้งได้

ผู้วิจัยจึงได้เริ่มศึกษาและค้นหางานวิจัยเกี่ยวกับการพยากรณ์ยอดขายของปุ๋ยมูลไก่ ซึ่งพบว่า นักวิชาการและนักวิจัยให้ความสำคัญกับการศึกษาการพยากรณ์ความต้องการของปุ๋ยอินทรีย์ประเภทมูลไก่ไม่มากนัก แต่พบงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน ได้แก่ การศึกษาแนวโน้มการส่งออกข้าวโพดสำหรับทำพันธุ์ หาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสม และพยากรณ์มูลค่าการส่งออกข้าวโพดในอนาคต เก็บรวบรวมสถิติการส่งออกย้อนหลัง 10 ปี โดยใช้วิธีบ็อก – เจนกินส์และวิธีการปรับเรียบของโสมท์-วินเทอร์ พบว่ารูปแบบที่มีความเหมาะสม คือ วิธีการปรับเรียบของโสมท์-วินเทอร์ ซึ่งมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่ำที่สุด [4]

ด้วยเหตุผลที่เกษตรกรเริ่มให้ความสำคัญกับปุ๋ยอินทรีย์ และยังไม่มียานวิจัยใดกล่าวถึงความต้องการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ประเภทมูลไก่โดยตรง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการพยากรณ์ยอดขายปุ๋ยมูลไก่เพื่อเป็นแนวทางการจัดหาและการจัดเก็บสินค้าให้กับผู้ประกอบการ และเกษตรกร ผู้วิจัยจึงเก็บรวบรวมข้อมูลยอดขายจริงย้อนหลัง 3 ปี มาทำการพยากรณ์ความต้องการใช้ปุ๋ยมูลไก่ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลา ทั้งหมด 4 วิธี คือ วิธีดัชนีฤดูกาลแบบวิธีอัตราส่วนต่อแนวโน้ม วิธีดัชนีฤดูกาลแบบวิธีค่าเฉลี่ย วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล และวิธีปรับให้เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบโสมท์-วินเทอร์และพิจารณาวิธีการพยากรณ์แบบต่าง ๆ โดยการวัดค่าความผิดพลาด 3 วิธี ประกอบด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ วิธีหาค่าความเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกำลัง และร้อยละค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย เพื่อให้ได้รูปแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมและเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด และนำค่าพยากรณ์ที่ได้มากำหนดปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด

2. ขอบเขตการวิจัย

ทำการศึกษาโดยเก็บข้อมูลยอดขายสินค้าจาก หจก. ช.มยุรี จำกัด ต.น้ำซุน อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์ ในส่วนของยอดขายปุ๋ยอินทรีย์ประเภทมูลไก่ ในช่วงระยะเวลาระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2563

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา

การเก็บข้อมูลความต้องการสินค้า มีช่วงห่างในการเก็บข้อมูลเท่า ๆ กัน เช่น เก็บข้อมูลทุกเดือน ทุกไตรมาส ทุกปี เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาว่าด้วยความต้องการสินค้ามีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ผ่านมา ดังนั้นความต้องการของสินค้าจะมากหรือน้อยนั้นเกิดจากอิทธิพล 4 ประการ ได้แก่ แนวโน้ม ฤดูกาล วัฏจักร [5]

3.2 การคำนวณดัชนีฤดูกาลด้วยวิธีอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

วิธีนี้เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีลักษณะคงที่พร้อมกับได้รับอิทธิพลของฤดูกาลหรือข้อมูลแสดงลักษณะที่ได้รับอิทธิพลของแนวโน้มรวมทั้งมีฤดูกาลเป็นวิธีที่ใช้สมการเชิงเส้นเป็นพื้นฐานในการพยากรณ์เบื้องต้น ขั้นตอนการคำนวณดัชนีฤดูกาลแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ [6]

3.2.1 จากข้อมูลยอดขายสินค้าในอดีตคำนวณหาสมการเชิงเส้น จากสูตร

$$F_t = a + bt \quad (1)$$

3.2.2 จากสูตร $F_t = a + bt$ อธิบายวิธีการหาของสมการนี้ โดยแบ่งออกสองส่วน ดังนี้

3.2.2.1 คำนวณหาค่า a จากสูตร

$$a = \frac{\sum A - b \sum t}{n} \quad (2)$$

โดยที่	$\sum A$	= ผลรวมของยอดขายจริง
	b	= ผลลัพธ์ของสมการข้อ 2.2
	$\sum t$	= ผลรวมของเวลา
	n	= จำนวนเวลาทั้งหมด

3.2.2.2 คำนวณหาค่า b จากสูตร

$$b = \frac{n \sum t A_t - \sum t \sum A}{n \sum t^2 - (\sum t)^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่ } n &= \text{จำนวนเวลาทั้งหมด} \\
 \Sigma t A_t &= \text{ผลรวมของเวลาคูณกับยอดขายจริง ณ ช่วงเวลา } t \\
 \Sigma t &= \text{ผลรวมของเวลา} \\
 \Sigma A &= \text{ผลรวมของยอดขาย} \\
 \Sigma t^2 &= \text{ผลรวมของเวลาคกำลังสอง} \\
 (\Sigma t)^2 &= \text{ผลรวมของเวลาทั้งหมดยกกำลังสอง}
 \end{aligned}$$

3.2.3 คำนวณค่าอัตราส่วน จากสูตร

$$\text{อัตราส่วน} = \frac{\text{ข้อมูลยอดขายจริง (A)}}{\text{ค่าแนวโน้ม (F}_t\text{)}} \quad (4)$$

3.2.4 นำอัตราส่วนที่คำนวณได้ของแต่ละฤดูกาลมาหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้คือดัชนีฤดูกาล

3.3 การคำนวณดัชนีฤดูกาลวิธีค่าเฉลี่ย

การคำนวณดัชนีฤดูกาลโดยวิธีค่าเฉลี่ยนิยมใช้มากกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากเข้าใจได้ง่ายขั้นตอนไม่ซับซ้อน และกระชับกว่าวิธีอัตราส่วน โดยยังสามารถให้ผลลัพธ์ค่าดัชนีฤดูกาลที่ใกล้เคียงกันมาก หากในการนำดัชนีฤดูกาลมาช่วยพยากรณ์นั้น ผู้พยากรณ์ต้องเลือกวิธีการพยากรณ์ที่จะใช้เป็นค่าพยากรณ์เบื้องต้นในการนำค่าดัชนีฤดูกาลที่หาได้มาปรับค่าตามอิทธิพลของฤดูกาล ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีดัชนีฤดูกาลวิธีค่าเฉลี่ยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ [6]

3.3.1 คำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลยอดขายจริงแต่ละฤดูกาล

3.3.2 คำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลยอดขายจริงทั้งหมด

3.3.3 คำนวณดัชนีฤดูกาล จากสูตร

$$\text{ค่าดัชนีฤดูกาลแบบค่าเฉลี่ย} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูลยอดขายจริงแต่ละฤดูกาล}}{\text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูลยอดขายจริงทั้งหมด}} \quad (5)$$

3.4 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ค่าพยากรณ์ของช่วงเวลาที่ผ่านมามักเข้ากับอัตราส่วนความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงกับค่าพยากรณ์ ณ ช่วงเวลานั้น โดยใช้หลักการเดียวกันกับค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนักและให้ความสำคัญกับข้อมูลชุดใหม่มากที่สุดและค่อย ๆ ลดค่าถ่วงน้ำหนักลงมากับข้อมูลเก่า ๆ โดยสมการดังต่อไปนี้ [7]

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}) \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้ F_t = ค่าพยากรณ์ใหม่ที่ต้องการ

F_{t-1} = ค่าพยากรณ์ช่วงที่ผ่านมา

α = ค่าคงที่ปรับเรียบ, $0 \leq \alpha \leq 1$

A_{t-1} = ข้อมูลจริง ณ ช่วงเวลา $t-1$ (ยอดขายจริงก่อนหน้า)

3.5 วิธีปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์-วินเทอร์

วิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบมีแนวโน้ม วิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบมีแนวโน้ม เรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่าปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลสองชั้น หรือการพยากรณ์โดยวิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์-วินเทอร์ จะใช้ในกรณีที่ข้อมูลยอดขายมีแนวโน้มโดยไม่มีอิทธิพลของฤดูกาลมาเกี่ยวข้องสมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 7 - 9:[8]

$$F / T_t = F_t - T_t \quad (7)$$

$$F_t = \alpha(A_{t-1}) + (1 - \alpha)(F_{t-1} + T_{t-1}) \quad (8)$$

$$T_t = \beta(F_t - F_{t-1}) + (1 - \beta)(F_{t-1} + T_{t-1}) \quad (9)$$

เมื่อกำหนดให้ F_t = ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้าเมื่อมีแนวโน้ม ณ ช่วงเวลา t

T_t = ค่าความต้องการสินค้าเอกซ์โพเนนเชียลปรับเรียบ ณ ช่วงเวลา t

A_t = ข้อมูลจริง ณ ช่วงเวลา t

α = ค่าคงที่ปรับเรียบสำหรับค่าเฉลี่ย

β = ค่าคงที่ปรับเรียบสำหรับแนวโน้ม

3.6 ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์

เทคนิควัดความแม่นยำโดยแก้ปัญหา วิธีหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดโดยการพิจารณาความแตกต่างยอดขายจริงกับยอดขายพยากรณ์โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$MAD = \frac{\sum |A_t - F_t|}{n} \quad (10)$$

เมื่อกำหนดให้ A_t = ข้อมูลยอดขายสินค้าจริง ณ ช่วงเวลา t เมื่อ $t = 1, 2, 3,$

F_t = ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้า ณ ช่วงเวลา t

n = จำนวนเวลาทั้งหมด

3.7 ค่าความเฉลี่ยคาดเคลื่อนกำลังสอง

วิธีวัดความแม่นยำโดยแก้ ปัญหาวิธีหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดโดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างยอดขายจริงกับยอดขายพยากรณ์โดยวิธียกกำลังสองสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$MSE = \frac{\sum |A_t - F_t|^2}{n} \quad (11)$$

3.8 ร้อยละค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย

เป็นวิธีวัดความแม่นยำโดยคำนวณร้อยละความผิดพลาดในการพยากรณ์ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย ค่าที่ได้ต่ำ มีความแม่นยำสูง [9]

$$MAPE = \left(\frac{\frac{\sum |A_t - F_t|}{A_t}}{n} \right) \times 100 \quad (12)$$

3.9 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ความต้องการมีความแน่นอน ลักษณะคงที่ ความแปรปรวนน้อย ค่าความแปรปรวนจะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถใช้ความต้องการสินค้าในการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม [10]

$$VC = \frac{\text{Est var D}}{(\bar{d})^2} \quad (13)$$

เมื่อกำหนดให้	VC	= ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน
	Est Var D	= ค่าความแปรปรวนของความต้องการสินค้า
	$\bar{d}$	= ค่าเฉลี่ยความต้องการสินค้าย้อนหลัง

3.10 ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม

ตัวแบบนี้เป็นวิธีการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้งที่ง่ายที่สุดซึ่งทำให้ต้นทุนรวมของการสั่งซื้อและการเก็บรักษามีค่าต่ำที่สุด การกำหนดปริมาณของสินค้าคงคลังที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการบริหารสินค้าคงคลัง โดยจะพิจารณาสิ่งต่าง ๆ โดยมีสูตรการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมดังต่อไปนี้ [11]

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (14)$$

เมื่อกำหนดให้	D	= ความต้องการสินค้าในเวลา 1 ปี
	S	= ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อครั้ง
	H	= ต้นทุนของสินค้าต่อหน่วย

4 การดำเนินการวิจัย

4.1 เก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บข้อมูลยอดขายจริงของปั๊มนมไก่ ย้อนหลัง 3 ปี คือ ตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ.2561 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 จาก หจก. ช.มยุรี จำกัด และแบ่งออกเป็นไตรมาส

ตารางที่ 1 ยอดขายแต่ละไตรมาสของ ปี พ.ศ. 2561-2563 จาก หจก. ช.มยุรี จำกัด

ปีที่	ไตรมาสที่	ยอดขาย
2561	1	20,764
	2	16,620
	3	15,220
	4	10,401
2562	1	18,919
	2	17,477
	3	12,676
	4	11,322
2563	1	21,234
	2	18,341
	3	13,772
	4	10,928

4.2 วิเคราะห์หาเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสม

พยากรณ์ความต้องการ โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์ 4 วิธี คือ วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม วิธีดัชนีฤดูกาลแบบค่าเฉลี่ย วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล และวิธีปรับให้เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์-วินเทอร์ ด้วยการใส่โปรแกรมไมโครซอฟท์ เอ็กเซล เวอร์ชัน 2016 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

4.3 วิธีดัชนีฤดูกาลแบบวิธีอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

4.3.1 นำข้อมูลยอดขายสินค้าในอดีตคำนวณหาสมการเชิงเส้น ที่ได้กำหนดไว้ในสมการที่ (1) - (3) [6]

ตารางที่ 2 ที่มาและผลลัพธ์สมการเชิงเส้น ของวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาส ที่	a	bt	$F_t = a + bt$	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	1	17,580.60	-298.63	$= 17,580.60 + (-298.63)$	17,281.97
	2	17,580.60	-597.26	$= 17,580.60 + (-597.26)$	16,983.34
	3	17,580.60	- 895.89	$= 17,580.60 + (-895.89)$	16,684.71
	4	17,580.60	-1,194.52	$= 17,580.60 + (-1,194.52)$	16,386.08
2562	1	17,580.60	-1,493.15	$= 17,580.60 + (-1,493.15)$	16,087.45
	2	17,580.60	-1,791.78	$= 17,580.60 + (-1,791.78)$	15,788.82
	3	17,580.60	-2,090.41	$= 17,580.60 + (-2,090.41)$	15,490.19
	4	17,580.60	-2,389.03	$= 17,580.60 + (-2,389.03)$	15,191.57
2563	1	17,580.60	-2,687.66	$= 17,580.60 + (-2,687.66)$	14,892.94
	2	17,580.60	-2,986.29	$= 17,580.60 + (-2,986.29)$	14,594.31
	3	17,580.60	-3,284.92	$= 17,580.60 + (-3,284.92)$	14,295.68
	4	17,580.60	-3,583.55	$= 17,580.60 + (-3,583.55)$	13,997.05

4.3.2 คำนวณอัตราส่วน โดยอ้างอิงสมการที่ 4

ตารางที่ 3 ที่มาและผลลัพธ์อัตราส่วน ของวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาสที่	ยอดขายจริง	ค่าแนวโน้ม	อัตราส่วน	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	1	20,764	17,281.97	$= 20,764 / 17,281.97$	1.20
	2	16,620	16,983.34	$= 16,620 / 16,983.34$	0.98
	3	15,220	16,684.71	$= 15,220 / 16,684.71$	0.91
	4	10,401	16,386.08	$= 10,401 / 16,386.08$	0.63
2562	1	18,919	16,087.45	$= 18,919 / 16,087.45$	1.18
	2	17,477	15,788.82	$= 17,477 / 15,788.82$	1.11
	3	12,676	15,490.19	$= 12,676 / 15,490.19$	0.82
	4	11,322	15,191.57	$= 11,322 / 15,191.57$	0.75
2563	1	21,234	14,892.94	$= 21,234 / 14,892.94$	1.43
	2	18,341	14,594.31	$= 18,341 / 14,594.31$	1.26
	3	13,772	14,295.68	$= 13,772 / 14,295.68$	0.96
	4	10,928	13,997.05	$= 10,928 / 13,997.05$	0.78

4.3.3 คำนวณหาค่าดัชนีฤดูกาลของแต่ละไตรมาส เพื่อนำไปทำการพยากรณ์

ตารางที่ 4 ที่มาและผลลัพธ์ของค่าดัชนีฤดูกาล ของวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาสที่	ยอดขายจริง	อัตราส่วน	ดัชนีฤดูกาล	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	1	20,764	1.2	$= (1.2 + 1.18 + 1.43) / 3$	1.27
	2	16,620	0.98	$= (0.98 + 1.11 + 1.26) / 3$	1.11
	3	15,220	0.91	$= (0.91 + 0.82 + 0.96) / 3$	0.9
	4	10,401	0.63	$= (0.63 + 0.75 + 0.78) / 3$	0.72
2562	1	18,919	1.18		
	2	17,477	1.11		
	3	12,676	0.82		
	4	11,322	0.75		
2563	1	21,234	1.43		
	2	18,341	1.26		
	3	13,772	0.96		
	4	10,928	0.78		

4.3.4 พยากรณ์ความต้องการของสินค้า

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์การพยากรณ์แบบวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาสที่	ค่าแนวโน้ม	ค่าดัชนีฤดูกาล	ค่าพยากรณ์ดัชนีฤดูกาล	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	1	17,281.97	1.27	$= 17,281.97 \times 1.27$	21,948.10
	2	16,983.34	1.11	$= 16,983.34 \times 1.11$	18,851.51
	3	16,684.71	0.9	$= 16,684.71 \times 0.9$	15,016.24

ตารางที่ 5 (ต่อ) ผลลัพธ์การพยากรณ์แบบวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาสที่	ค่าแนวโน้ม	ค่าดัชนีฤดูกาล	ค่าพยากรณ์ดัชนีฤดูกาล	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	4	16,386.08	0.72	$= 16,386.08 \times 0.72$	11,797.98
2562	1	16,087.45	1.27	$= 16,087.45 \times 1.27$	20,431.06
	2	15,788.82	1.11	$= 15,788.82 \times 1.11$	17,525.59
	3	15,490.19	0.9	$= 15,490.19 \times 0.9$	13,941.17
	4	15,191.57	0.72	$= 15,191.57 \times 0.72$	10,937.93
2563	1	14,892.94	1.27	$= 14,892.94 \times 1.27$	18,914.03
	2	14,594.31	1.11	$= 14,594.31 \times 1.11$	16,199.68
	3	14,295.68	0.9	$= 14,295.68 \times 0.9$	12,866.11
	4	13,997.05	0.72	$= 13,997.05 \times 0.72$	10,077.88

4.4 วิธีดัชนีฤดูกาลแบบค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์การพยากรณ์แบบวิธีดัชนีฤดูกาลแบบค่าเฉลี่ย

ปีที่	ไตรมาสที่	ค่าแนวโน้ม	ค่าดัชนีฤดูกาล	ค่าพยากรณ์ดัชนีฤดูกาล	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2561	1	17,281.97	1.3	$= 17,281.97 \times 1.27$	22,466.56
	2	16,983.34	1.12	$= 16,983.34 \times 1.12$	19,021.34
	3	16,684.71	0.89	$= 16,684.71 \times 0.89$	14,849.39
	4	16,386.08	0.7	$= 16,386.08 \times 0.70$	11,470.26
2562	1	16,087.45	1.3	$= 16,087.45 \times 1.30$	20,913.69
	2	15,788.82	1.12	$= 15,788.82 \times 1.12$	17,683.48
	3	15,490.19	0.89	$= 15,490.19 \times 0.89$	13,786.27
	4	15,191.57	0.7	$= 15,191.57 \times 0.70$	10,634.10

ตารางที่ 6 (ต่อ) ผลลัพธ์การพยากรณ์แบบวิธีดัชนีฤดูกาลแบบค่าเฉลี่ย

ปีที่	ไตรมาส ที่	ค่าแนวโน้ม	ค่าดัชนีฤดูกาล	ค่าพยากรณ์ดัชนีฤดูกาล	
				ที่มา	ผลลัพธ์
2563	1	14,892.94	1.3	$= 14,892.94 \times 1.30$	19,360.82
	2	14,594.31	1.12	$= 14,594.31 \times 1.12$	16,345.63
	3	14,295.68	0.89	$= 14,295.68 \times 0.89$	12,723.16
	4	13,997.05	0.7	$= 13,997.05 \times 0.70$	9,797.94

4.5 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์การพยากรณ์ของวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ปีที่	ไตรมาสที่	ยอดขาย	ค่าพยากรณ์
2561	1	20,764	20,764.00
	2	16,620	20,764.00
	3	15,220	19,313.60
	4	10,401	17,880.84
2562	1	18,919	15,262.90
	2	17,477	16,542.53
	3	12,676	16,869.60
	4	11,322	15,401.84
2563	1	21,234	13,973.89
	2	18,341	16,514.93
	3	13,772	17,154.06
	4	10,928	15,970.34

4.6 วิธีปรับให้เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์วินเทอร์

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์การพยากรณ์ของวิธีปรับให้เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์วินเทอร์

ปีที่	ไตรมาสที่	ช่วงเวลา	Y	E	T	S	Y HAT
			SALES	LEVEL	TREND	SEASONAL	FORECAST
2561	1	1	20,764			5,012.8	
	2	2	16,620			868.8	
	3	3	15,220			(531.3)	
	4	4	10,401	15,751.25	0.00	(5,350.3)	
2562	1	5	18,919	15,751.25	0.00	5,199.42	20,764.00
	2	6	17,477	15,751.25	0.00	1,127.45	16,620.00
	3	7	12,676	15,751.25	0.00	-248.21	15,220.00
	4	8	11,322	15,751.25	0.00	-4,983.45	10,401.00
2563	1	9	21,234	15,751.25	0.00	5,382.84	20,950.67
	2	10	18,341	15,751.25	0.00	1,381.65	16,878.70
	3	11	13,772	15,751.25	0.00	29.90	15,503.04
	4	12	10,928	15,751.25	0.00	-4,623.02	10,767.80

4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์

4.7.1 นำค่าพยากรณ์ที่ได้จากการพยากรณ์แต่ละเทคนิค มาหาค่าความคลาดเคลื่อน และเปรียบเทียบว่าเทคนิคการพยากรณ์วิธีใด มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และมีความแม่นยำมากที่สุด อ้างอิงจากสมการที่ 10 - 12

ตารางที่ 9 ผลลัพธ์ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์แต่ละเทคนิค

ลำดับ	เทคนิคการพยากรณ์	ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์		
		MAD	MSE	MAPE
1	วิธีดัชนีฤดูกาล แบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม	1,203.63	1,993,542.09	7.71
2	วิธีดัชนีฤดูกาล แบบค่าเฉลี่ย	1,239.21	1,932,216.10	7.98
3	วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียล	3,841.00	19,271,435.96	27.7
4	วิธีปรับให้เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์-วินเทอร์	1,225.48	2,087,426.46	8.28

4.7.2 จากตารางที่ 10 จะพบว่า วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด 2 ใน 3 วิธี จึงเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการนำไปปรับใช้กับการพยากรณ์ปริมาณความต้องการสินค้าในอนาคต

4.8 คำนวณพยากรณ์ความต้องการสินค้า ปี พ.ศ. 2564 ของรูปแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 10 ผลลัพธ์การพยากรณ์ ปี พ.ศ. 2564 ของ เทคนิคการพยากรณ์
แบบวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม

ปีที่	ไตรมาสที่	ค่าแนวโน้ม			ค่าดัชนี ฤดูกาล	ค่าพยากรณ์ดัชนี ฤดูกาล
		a	bt	ผลลัพธ์		
2564	1	17,580.60	$= (-298.63) \times 13$	13,698.41	1.27	17,396.98
	2	17,580.60	$= (-298.63) \times 14$	13,399.78	1.11	14,873.76
	3	17,580.60	$= (-298.63) \times 15$	13,101.15	0.9	11,791.04
	4	17,580.60	$= (-298.63) \times 16$	12,802.52	0.72	9,217.81

4.9 คำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม

4.9.1 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน โดยอ้างอิงจากสมการ 13

$$VC = \frac{2,548,023.58}{27,177,106.69}$$

$$VC = 0.09$$

ค่า VC เท่ากับ 0.09 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.25 ดังนั้นความต้องการมีความแน่นอน ลักษณะคงที่ ความแปรปรวนน้อยอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถใช้ความต้องการสินค้าในการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม

4.9.2 คำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม โดยอ้างอิงจากสมการ 14

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DH}{s}}$$

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \times 53,280 \times 4,298}{40}}$$

$$EOQ = 3,384 \text{ กระสอบต่อครั้ง}$$

5. ผลการวิจัย

การพยากรณ์วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม มีความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความคลื่อนน้อยที่สุด 2 ใน 3 คือ ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนสมบูรณ์ 1,203.63 และร้อยละค่าผิดพลาดสมบูรณ์เฉลี่ย 7.71 และการพยากรณ์ยอดขายในปี พ.ศ. 2564 ที่ได้จากเทคนิคการพยากรณ์วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม เท่ากับ 53,280 กระสอบต่อปี จากการนำค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้า ปี พ.ศ. 2564 ที่ได้จากเทคนิคพยากรณ์ที่เหมาะสม ผลของการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน เท่ากับ 0.09 ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม เท่ากับ 3,384 กระสอบต่อครั้ง

6. สรุป

การพยากรณ์วิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้ม มีค่าความคลื่อนน้อยที่สุด 2 ใน 3 จากการหาค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนสมบูรณ์ และร้อยละค่าผิดพลาดสมบูรณ์เฉลี่ย ซึ่งจากชุดข้อมูลของความต้องการสินค้า มีลักษณะเป็นฤดูกาล กล่าวคือ มีความต้องการซื้อสินค้าปริมาณมากในช่วงทำการเกษตร ดังนั้นเทคนิคการพยากรณ์ด้วยวิธีดัชนีฤดูกาลแบบอัตราส่วนต่อแนวโน้มจึงเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสม และมีความแม่นยำมากที่สุด เหมาะแก่การนำไปปรับใช้กับการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ทันเวลา หลังจากที่ได้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม และกำหนดหาต้นทุนสินค้าคงคลังรวมก่อน และหลังทำการสั่งซื้อปริมาณที่เหมาะสม เพื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายสินค้าคงคลังรวม พบว่าการกำหนดหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม ทำให้ต้นทุนสินค้าคงคลังรวมลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนสินค้าคงคลังรวมของปีที่ผ่านมา ดังนั้น การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม จะส่งผลให้การจัดการสินค้าคงคลังมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากมีสินค้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า ไม่มีสินค้าคงคลังมากจนเกินไป และประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง

7. ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลชุดนี้มีลักษณะเป็นฤดูกาล เนื่องจากมีความต้องการสินค้าปริมาณมากในช่วงทำการเกษตร ดังนั้นก่อนเลือกใช้เทคนิคการพยากรณ์ควรดูแนวโน้มยอดขายก่อน เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการพยากรณ์ หากมีข้อมูลยอดขายย้อนหลังจำนวนหลายปี และทำการเปรียบเทียบค่าความคลื่อนของการพยากรณ์หลายๆเทคนิค จะทำให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น ผลลัพธ์ของตัวเลขอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการปัดจุดทศนิยม

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรือเอก ดร.สราวุธ ลักษณะโต ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูง ในการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และ หจก. ช.มยุรี จำกัด ที่สนับสนุน และมอบข้อมูลที่ใช้เป็นในการศึกษา และวิจัยครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบูรณ์. (2563). ข้อมูลพื้นฐานด้านการเกษตรจังหวัดเพชรบูรณ์. สืบค้น 21 พฤศจิกายน 2565, จาก <http://www.phetchabun.doae.go.th/?p=195>
- [2] พิรพล สุรงษา. (2563). สถานการณ์การผลิตพืชจังหวัดเพชรบูรณ์. กลุ่มยุทธศาสตร์และสารสนเทศ จังหวัดเพชรบูรณ์. สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบูรณ์สืบค้น 21 พฤศจิกายน 2565, จาก <http://www.phetchabun.doae.go.th/wp-content>
- [3] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์. (2562). ข้อมูลพื้นฐานด้านการเกษตรจังหวัดเพชรบูรณ์. สืบค้น 21 พฤศจิกายน 2565, จาก <http://www.phetchabun.doae.go.th/?p=195>
- [4] จรรยา เทนตันเทียะ. (2564). วิเคราะห์แนวโน้มการส่งออกข้าวโพด. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้).
- [5] ธนัยชนก จันทร์หอม. (2564). การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา เพื่อกำหนดการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุดของ โรงงานผลิตยางซิลิโคนแห่งหนึ่ง. (วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร)
- [6] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2556). การพยากรณ์สำหรับฤดูกาล. สืบค้น 21 พฤศจิกายน 2565, จาก https://www.en.rmutt.ac.th/ie/files/PPC_2_Forecasting_2-2556_Part_2_bw.pdf
- [7] อังคณา สุขเหล็ก. (2563). การศึกษาเทคนิคการพยากรณ์รูปแบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการหา กำไรในอนาคตสำหรับบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย กลุ่มธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับ อาหาร 4 หมวดธุรกิจ. (สารนิพนธ์หลักสูตรบัญชีมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์)
- [8] ศิลวัชร แก้วพิจิตร. (2564). การเปรียบเทียบวิธีพยากรณ์ความต้องการแคลสสำหรับการผลิต กระแสไฟฟ้า กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าชีวมวลแห่งหนึ่ง. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร).
- [9] ปิยะมาส กล้าแข็ง. (2565). การพยากรณ์. สืบค้น 22 พฤศจิกายน 2565, จาก https://elcls.ssru.ac.th/piyamas_kl/pluginfile.php/79/mod_resource/content/1/Chapter%203%20%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%203%20Forecast.pdf
- [10] จิตรา โสดา. (2563). การวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมร้านค้าปลีกวัสดุก่อสร้าง. (วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์).
- [11] ไออี บิสซิเนส โซลูชัน จำกัด(อินเทอร์เนต). (2565). ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม. สืบค้น 23 พฤศจิกายน 2565. จาก <https://ieprosoft.com/eoq-economic-order-quantity>

การบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Carbon Credit Management in Supply Chain using Geographic Information System

^{1*} ชณิชา หมอยาดี, ^{2#} ธิติ จิรวรรณกร, ^{3#} ชลิตา ตรียานนิช และ ^{4#} ปญญารักษ์ โกศลวัฒน์

^{1,2}วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

³คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

⁴กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Received : October 2, 2022

Revised : December 13, 2022

Accepted : December 20, 2022

^{1*} Chanicha Moryadee, ^{2#} Thiti Jirawatcharakorn, ^{3#} Chalita Thriyawanich and ^{4#} Panyarak Kosanwat

^{1,2} College of Logistics and Supply Chain, Suan Sunandha Rajabhat University

³ Faculty of Business Administration, Bangkokthonburi University

⁴ Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy

*chanicha.mo@ssru.ac.th, #s61484923013@ssru.ac.th, #chalita.thr@bkkthon.ac.th, #panyarak@rtaf.mi.th

บทคัดย่อ

จากแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติฉบับที่ 12 ยุทธศาสตร์ที่ 4 การเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป้าหมายที่ 4 เพิ่มประสิทธิภาพการลดก๊าซเรือนกระจก และขีดความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่คาร์บอนเครดิตและโอกาสทางธุรกิจใหม่ที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนเครดิตจึงมีความสำคัญ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีรูปแบบในการบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทาน การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีระบบการจัดการฐานข้อมูลแบบ Cloud Database โดยใช้ MySQL Server ในการบริหารจัดการฐานข้อมูล และใช้การแสดงผลตำแหน่งแผนที่ต่าง ๆ ผ่าน Google Map สามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานผ่านทาง Application Line โดยกลุ่มตัวอย่างมาจากการคัดเลือกโดยเฉพาะเจาะจง จำนวน 21 คน (ผู้กำหนดทางด้านการขายคาร์บอนเครดิตแห่งชาติ จำนวน 7 คน ผู้เชี่ยวชาญด้านคาร์บอนเครดิตจำนวน 7 คน และนักธุรกิจที่มีข้อมูลเชื่อมโยงกับคาร์บอนเครดิตจำนวน 7 คน) การจัดเก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือเป็นแบบสัมภาษณ์เชิงลึกแบบเจาะจง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพในเชิงเนื้อหาและการอภิปรายผล ผลการวิจัยกลุ่มตัวอย่างพบว่า ประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ มีความพึงพอใจมาก ($\bar{x} = 4.36$) ข้อค้นพบดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทาน เพิ่มมูลค่าเพิ่มให้แก่คาร์บอนเครดิต สร้างโอกาสเกี่ยวกับธุรกิจใหม่ ๆ ที่เกี่ยวข้องตามแผนยุทธศาสตร์แห่งชาติ และสามารถสร้างรายได้ให้กับองค์กรธุรกิจที่สนใจ รวมถึงประโยชน์อื่น ๆ เช่น ด้านการป้องกันสิ่งแวดล้อม หรือการลดภาษีให้แก่องค์กรต่าง ๆ

คำสำคัญ: คาร์บอนเครดิต, การบริหารจัดการโซ่อุปทาน, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

Abstract

The 4th goal in the 4th strategy of Thailand 12th National Economic and Social Development Plan, to increase the efficiency of greenhouse gas reduction and the ability in adaptation to the climate change, has made value-added carbon credit and new business opportunity related to carbon credit become more significant, while there is no form of carbon credit management present. The objectives of this research were to manage carbon credit in supply chain using Geographic Information System. Developed as program computer use cloud database on MySQL Server, display maps on Google Map and send data via Line Application. The sample group was purposive sampling; a total of 21 persons included 7 carbon credit policymakers, 7 carbon credit specialist, and 7 business persons related to carbon credit. The data was gathered by using the in-depth interview and data was analyzed by using the qualitative analysis in the content and discussion. The research findings revealed that the efficiency of the carbon credit management in supply chain was at the most effective. The findings of the research can be use in carbon credit management platform in the supply chain, creating value-added carbon credit and a new business opportunity related to the national strategic plan, creating revenue for any business organizations that are interested in this opportunity including other advantages, for example, environmental protection or tax reduction for the organization.

Keywords: Carbon Credit, Supply Chain Management, Geographic Information System

1. บทนำ

สภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เกิดขึ้นในปัจจุบันก่อให้เกิดสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และน้ำแข็งที่ขั้วโลกละลายเร็วกว่าที่นักวิทยาศาสตร์ได้คาดการณ์เอาไว้ ส่งผลให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น และก่อให้เกิดสภาพอากาศที่แปรปรวนไปทั่วโลก เช่น ปรากฏการณ์ El Nino หรือปรากฏการณ์ La Nina ซึ่งก่อให้เกิดอุทกภัย วาตภัย และภัยธรรมชาติต่าง ๆ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยมีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในแต่ละประเทศในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลากว่า 100 ปี ที่ผ่านมาที่โลกเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรม ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกนั้น จะไปรวมตัวกันที่ชั้นบรรยากาศของโลก ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งทำให้ชั้นบรรยากาศของโลกมีความเบาบางลง ส่งผลให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นโลกมีความแรงเพิ่มขึ้นและมีความร้อนที่เพิ่มตามไปด้วย ก๊าซเรือนกระจกทำให้รังสีความร้อนในย่านอินฟราเรดที่แผ่มาจากพื้นผิวโลกสะท้อนกลับไปยังผิวโลก เมื่อชนเข้ากับก๊าซเรือนกระจกแทนที่จะเดินทางออกไปสู่อวกาศทำให้โลกสะสมความร้อนไว้จึงเกิดภาวะโลกร้อน [1]

จากสภาวะเรือนกระจกดังกล่าว ทำให้นานาประเทศได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว และได้ร่วมกันทำข้อตกลงระหว่างประเทศที่เรียกกันว่า ข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) ซึ่งเป็นความตกลงตามกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ พ.ศ. 2563 เป็นต้นไป โดยมีการลงนามเห็นชอบร่วมกันเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม 2558 ซึ่งประเทศไทยก็ได้อยู่ในกลุ่มประเทศที่ทำข้อตกลงดังกล่าวด้วย โดยตั้งเป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจกของโลกลง เพื่อควบคุมไม่ให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นเกิน 2 องศาเซลเซียส (ในปัจจุบันมีการขยับเป้าหมายลงมาที่ 1.5 องศาเซลเซียส) โดยในข้อตกลงดังกล่าวประเทศไทย

กำหนดให้มีเป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจกให้ได้ต่ำกว่าระดับปกติที่ร้อยละ 7-20 ภายในปี พ.ศ. 2563 และลดให้ได้ต่ำกว่าระดับปกติที่ร้อยละ 20-25 ภายในปี พ.ศ. 2573 [2]

จากข้อตกลงดังกล่าว ประเทศไทยจึงต้องเตรียมความพร้อมในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้และภายใต้การแข่งขันการค้าที่เพิ่มขึ้น มีการกีดกันทางการค้าโดยอ้างถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการเจรจาการค้าระหว่างประเทศ อีกทั้งให้สอดคล้องกับวาระการพัฒนาที่ยั่งยืนของโลก ค.ศ. 2030 จึงทำให้ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 มีการกำหนดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไว้ในยุทธศาสตร์ที่ 4 การเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป้าหมายที่ 4 เพิ่มประสิทธิภาพการลดก๊าซเรือนกระจก และขีดความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในการเตรียมความพร้อมการดำเนินการตามยุทธศาสตร์ที่กำหนดขึ้นให้เป็นไปตามกรอบระยะเวลาที่ตั้งไว้โดยเริ่มดำเนินการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นมา ในการเก็บรวบรวมค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย

จากเป้าหมายในการลดอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงนั้น เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถจับต้องได้จึงต้องนำสิ่งที่นำมาใช้ในการวัดได้คือ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่เกิดของสิ่งต่าง ๆ ไปจนจบชีวิต และได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานกลางขึ้นมาใช้ทั่วโลกเรียกว่า ค่าคาร์บอนเครดิต ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิงในการลดค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกของหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งจะมีความน้อยแตกต่างกันไปตามรูปแบบของสินค้า ธุรกิจ หรือกิจกรรมด้านอุตสาหกรรมในแต่ละประเทศ ส่งผลให้มีความต้องการทั้งที่ต้องการซื้อและที่ต้องการขายคาร์บอนเครดิต จึงทำให้เกิดตลาดคาร์บอนเครดิตขึ้น เพื่อผลประโยชน์ในทางธุรกิจทั้งด้านการแข่งขันของสินค้า ซึ่งในหลายประเทศมีแนวโน้มเกี่ยวกับด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เพิ่มเติมมากขึ้นในปัจจุบัน ก่อให้เกิดโครงการของหน่วยงานต่าง ๆ ในการลดค่าคาร์บอนเครดิต ในหลายรูปแบบ เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดคาร์บอนเครดิต แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการที่มีสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ คาร์บอนเครดิต เป็นสินค้าที่สามารถซื้อขายได้ และสามารถนำมาชดเชยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผู้ซื้อโดยแบ่งออกเป็นตลาดคาร์บอนภาคบังคับและภาคสมัครใจ [3] จึงทำให้เกิดช่องทางใหม่ในการดำเนินการธุรกิจด้านคาร์บอนเครดิตได้ ซึ่งในปัจจุบันมีหน่วยงานที่กำกับดูแลธุรกิจนี้คือ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นหน่วยงานในกำกับของรัฐ ที่เกิดขึ้นตามพระราชกฤษฎีกาจัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พ.ศ. 2550 [1] มีหน้าที่คอยกำกับดูแล ควบคุม และให้ความรู้แก่หน่วยงานต่าง ๆ แต่ที่ผ่านมายังไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง อีกทั้งงบประมาณที่มีจำกัด ทำให้การประชาสัมพันธ์ต่าง ๆ ยังไม่เข้าถึงหน่วยงานโดยทั่วไป

ในปัจจุบันได้มีหน่วยงานที่เริ่มตระหนักและสนใจในการลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ แต่ส่วนใหญ่ยังเป็นเพียงหน่วยงานขนาดใหญ่ไม่กี่หน่วยงานในประเทศไทย เช่น บริษัทที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับพลังงานน้ำมัน ไฟฟ้า ปูนซีเมนต์ และอื่น ๆ แต่เป็นการทำผ่านโครงการต่าง ๆ ในรูปแบบของการลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในขบวนการผลิตของหน่วยงานเท่านั้น ยังไม่มีระบบซื้อขายคาร์บอนเครดิตระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อนำมาลดค่าคาร์บอนเครดิต ทำให้การลดที่ผ่านมายังลดได้ไม่เพียงพอตามเป้าหมายที่ภาครัฐได้กำหนดไว้ ดังนั้น จึงต้องหาวิธีการเพิ่มเติมให้ค่าคาร์บอนเครดิตนั้น เป็นที่รู้จักเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณของค่าคาร์บอนเครดิต ไม่ให้จำกัดในหน่วยงานใหญ่เท่านั้น โดยให้กระจายไปยังภาคธุรกิจต่าง ๆ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องให้มีความรู้เกี่ยวกับค่าคาร์บอนเครดิตว่าสามารถนำมาดำเนินงานเป็นธุรกิจใหม่ที่มีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน

ทั้งนี้ หากต้องการให้มีการนำระบบซื้อขายคาร์บอนเครดิตมาใช้งานมากขึ้น ต้องเริ่มต้นที่ผู้ซื้อและผู้ขายคาร์บอนเครดิตต้องมีการกำหนดคุณสมบัติและขั้นตอนปฏิบัติต่าง ๆ ในการเข้าสู่ธุรกิจด้านนี้ที่ชัดเจนและเป็นมาตรฐานเดียวกัน มีหน่วยงานที่ให้ความรู้และคำปรึกษาที่ถูกต้อง เพื่อเป็นการขยายฐานตลาดคาร์บอนเครดิตให้มีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีการซื้อขายคาร์บอนเครดิตเพิ่มขึ้นไปด้วย จึงควรมีระบบในการซื้อขายคาร์บอนเครดิตขึ้นมารองรับการทำงานให้สะดวกและมีประสิทธิภาพในการซื้อขาย ซึ่งจะส่งผลให้คาร์บอนเครดิตเป็นสินค้าที่มีมูลค่าตลาดที่สูงขึ้น (Value Add) ตามหลัก

ของอุปสงค์ อุปทานโดยทั่วไป และตลาดยังเป็นตลาดใหม่ที่ยังมีจำนวนผู้เล่นไม่มาก จึงเป็นช่องทางในการทำธุรกิจที่ยังมีโอกาสในการดำเนินธุรกิจอีกยาวไกล

พิจารณาในส่วนของประโยชน์ที่จะได้รับจากการพัฒนาระบบซื้อขายคาร์บอนเครดิตนั้น จะพบว่าทางด้านการเงินเป็นปัจจัยสำคัญในการจูงใจให้เข้าสู่ธุรกิจด้วยเช่นกัน จากเป้าหมายระยะสั้นที่ต้องการลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ลงตามข้อตกลงปารีสในปี พ.ศ. 2563 ที่ร้อยละ 7-20 นั้น ถึงปัจจุบันยังไม่สามารถทำได้ใกล้เคียงกับเป้าหมายดังกล่าวในทุกประเทศ และมีความพยายามเพิ่มเป้าหมายให้เป็นในอนาคตภายใน 50 ปีข้างหน้าจะเป็นโลกที่ไม่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์เลย (Race to Zero) [5] ซึ่งกำลังมีความพยายามให้ไปสู่จุดนั้นให้ได้ ดังนั้นต้องมีมาตรการที่เข้มข้นและจริงจังมากขึ้น โดยมูลค่าตลาดคาร์บอนเครดิตเบื้องต้นนั้น จากอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2562 ที่ 250 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ [6] และราคาอ้างอิงตลาดของค่าคาร์บอนเครดิตอยู่ที่ตันละประมาณ 600 บาท จะเห็นว่าในเบื้องต้นมีมูลค่า 150,000 ล้านบาท/ปี โดยประมาณหากต้องการทำตามเป้าหมายที่กำหนด โดยยังไม่รวมไปถึงค่าคาร์บอนเครดิตที่ตัวเลขดังกล่าวนี้ ยังเป็นค่าคาร์บอนเครดิตเฉพาะกิจกรรมที่สามารถวัดค่าได้บางอย่างเท่านั้น แต่ยังมีค่าคาร์บอนเครดิตอีกจำนวนมากยังไม่ได้ทำการศึกษา

จากตัวเลขคาร์บอนเครดิตดังกล่าว ยังเป็นตลาดภายในประเทศไทยเพียงเท่านั้น แต่คาร์บอนเครดิตยังสามารถขายเป็นสินค้าในตลาดระดับโลกได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากเป็นสินค้าที่ทั่วโลกมีความต้องการ โดยเฉพาะในประเทศที่มีความต้องการซื้อคาร์บอนเครดิตอีกเป็นจำนวนมาก เช่น จีน อเมริกา อินเดีย เป็นต้น จากปริมาณที่แต่ละประเทศปล่อยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ออกมานั้น ก็สามารถอนุมานได้ว่าตลาดนั้นมีขนาดใหญ่มาก และมีมูลค่าเรียกได้ว่าไม่จำกัด ทางด้านการเงินนั้นอาจจะเป็นช่องทางให้ประเทศไทยสามารถหารายได้จากการซื้อขายคาร์บอนเครดิตเพิ่มขึ้นได้อีกช่องทางหนึ่ง เนื่องจากประเทศไทยมีภาพลักษณ์ของผู้ขายคาร์บอนเครดิต เพราะไม่ใช่ประเทศอุตสาหกรรมหลัก อีกทั้ง รัฐบาลเล็งเห็นถึงความสำคัญของค่าคาร์บอนเครดิต เนื่องจากมีการกำหนดเป้าหมายการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตามข้อตกลงปารีส จึงทำการกำหนดเพิ่มเติมสิทธิประโยชน์ในด้านการลดหย่อนภาษีให้แก่หน่วยงานต่าง ๆ ที่สามารถลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ [7] ตามพระราชกฤษฎีกาว่าด้วยการยกเว้นรัษฎากร (ฉบับที่ 514) พ.ศ. 2554 [8] และเพื่อเป็นแรงจูงใจให้หน่วยงานต่าง ๆ เข้าสู่ตลาดคาร์บอนเครดิตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์จากการลดค่าคาร์บอนเครดิต [9] ตลอดจนยังมีประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ความรับผิดชอบต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของหน่วยงาน ประชาสัมพันธ์หน่วยงาน ลดช่องว่างในการคิดกันทางการค้าระหว่างประเทศได้ในบางรายการสินค้า [10] และหน่วยงานสามารถซื้อ ขาย ค่าคาร์บอนเครดิตได้ ในกรณีที่มีความต้องการค่าคาร์บอนเครดิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น [11] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้บริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบการจัดการฐานข้อมูลแบบ Cloud Database โดยใช้ MySQL Server ในการบริหารจัดการฐานข้อมูล และใช้การแสดงผลตำแหน่งแผนที่ต่าง ๆ ผ่าน Google Map สามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานผ่านทาง Application Line

2. ขอบเขตงานวิจัย

กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ หน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในตลาดคาร์บอนเครดิต โดยหน่วยงานจะต้องสามารถวัดค่าคาร์บอนเครดิตของหน่วยงานได้ โดยคัดเลือกมาจากข้อมูลทุติยภูมิจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ที่มีการจัดเก็บค่าคาร์บอนเครดิตไว้

3. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ความหมายของคาร์บอนเครดิต

คาร์บอนเครดิต คือ สิทธิที่เกิดจากการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากการที่บุคคลหรือองค์กรได้ดำเนิน โครงการหรือมาตรการที่มีเป้าหมาย เพื่อลดการปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งสิทธิดังกล่าวนี้สามารถวัดปริมาณ และสามารถนำไปซื้อขายในตลาดซื้อขายคาร์บอนเครดิตได้ [12] อธิบายแบบง่าย คือ ก๊าซต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก (จำนวนคาร์บอน) ที่แต่ละองค์กรสามารถลดได้ต่อปี และหากปล่อยคาร์บอนน้อยกว่าเกณฑ์จะถูกตราค่าเป็นเงิน ก่อนจะถูกขายเป็นเครดิตให้กับองค์กรอื่นได้

ตามข้อตกลงในพิธีสารเกียวโตได้กำหนดกลไกต่าง ๆ ให้ประเทศพัฒนาแล้วต้องลดปริมาณการปล่อยก๊าซที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน หนึ่งในกลไกคือ การซื้อขายมลพิษ หรือ คาร์บอนเครดิตกับประเทศที่กำลังพัฒนา เพราะประเทศที่พัฒนาแล้วกำลังอยู่ในภาวะที่ไม่สามารถลดก๊าซที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจกลงตามที่กำหนดไว้ได้

3.2 การบริหารจัดการในโซ่อุปทาน (Supply Chain Management)

การบริหารจัดการในโซ่อุปทานเป็นกระบวนการในการดูแลและควบคุมกระบวนการขับเคลื่อนของสินค้าจากการผลิตและบริการให้กับลูกค้าหรือจากต้นน้ำ (Upstream) ไปสู่ปลายน้ำ (Downstream) เป้าหมายของการจัดการโซ่อุปทานคือการปรับปรุงประสิทธิภาพของโซ่อุปทาน เพื่อช่วยในการลดต้นทุนและการเติบโตของธุรกิจที่เกี่ยวข้องอย่างยั่งยืน [13]

3.3 ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS)

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เป็นระบบสารสนเทศที่ออกแบบมา เพื่อใช้รวบรวม จัดเก็บ วิเคราะห์ข้อมูลของพื้นที่ ทั้งที่ตั้งและรายละเอียดคุณลักษณะของพื้นที่นั้น ตลอดจนการสืบค้นข้อมูลและแสดงผลสารสนเทศ ดังนั้นระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ จึงมีใช้เพียงแผนที่หรือภาพถ่ายเท่านั้น แต่เป็นฐานข้อมูลซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ [14]

3.3.1 ฐานข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ประกอบด้วยฐานข้อมูล 2 ลักษณะคือ

ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ หรือฐานข้อมูลเชิงภาพ (Spatial or Graphic Database) ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ หรือฐานข้อมูลเชิงภาพ เป็นฐานข้อมูลแสดงลักษณะหรือสัญลักษณ์ของวัตถุ พื้นที่ หรือปรากฏการณ์ของธรรมชาติต่าง ๆ ที่ปรากฏบนพื้นที่โลกในเชิงตำแหน่ง ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่มีโครงสร้างข้อมูล 2 ประเภทคือ

3.3.1.1 โครงสร้างข้อมูลแบบแรสเตอร์ (Raster Structure) แสดงในรูปของตารางกริดสม่ำเสมอ โดยส่วนใหญ่เป็นกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งบางครั้งเรียกว่า จุดภาพ (Pixel) หรือ องค์ประกอบของภาพ (Picture Elements) แต่ละกริดซึ่งอ้างอิงตำแหน่งเป็นแถวและคอลัมน์ โดยมีตัวเลขที่แสดงชนิด หรือค่าข้อมูลที่ระบุคุณสมบัติที่สนใจ

3.3.1.2 โครงสร้างข้อมูลแบบเวกเตอร์ (Vector Structure) ใช้การจัดเก็บข้อมูลพิกัดตำแหน่ง (x,y) แทนลักษณะของแผนที่ (Map Feature) ได้แก่ จุด (Point) เส้น (Line) และอาณาบริเวณ (Polygon) ส่วนใหญ่นิยมใช้กับข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เช่น ลำน้ำ ถนน เป็นต้น

3.3.2 ฐานข้อมูลลักษณะเชิงอรรถาธิบาย (Attribute Database)

ฐานข้อมูลลักษณะสัมพันธ์ เป็นฐานข้อมูลที่อธิบายลักษณะ หรือคุณสมบัติของข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยเก็บข้อมูลทั้งเชิงคุณภาพและเชิงตัวเลขที่เกี่ยวข้องไว้ในระบบจัดการฐานข้อมูล (Database Management System) ต่าง ๆ เช่น dBase, Oracle, Sybase, Microsoft Access เป็นต้น ระบบการจัดการฐานข้อมูลนี้จะทำหน้าที่จัดการ และประมวลผลข้อมูลที่จะบอกคุณลักษณะของข้อมูลเชิงพื้นที่ การเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่เข้ากับข้อมูลลักษณะสัมพันธ์จะใช้รหัสร่วม (Common Key Code)

3.4 Google Map

Google Map คือ บริการของ Google ที่ให้บริการเทคโนโลยีด้านแผนที่ประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และให้ข้อมูลของธุรกิจในท้องถิ่น ได้แก่ ที่ตั้งของธุรกิจ รายละเอียดการติดต่อและเส้นทาง การขับขี่ โดยบริการแผนที่นี้เริ่มต้นให้บริการตั้งแต่กลางปีคริสต์ศักราช เป็นบริการฟรีจัดให้แก่ผู้ใช้ทั่วโลก ส่วนประกอบที่สำคัญที่ดึงดูดผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก คือ แผนที่

และภาพถ่ายดาวเทียมคุณภาพดีซึ่งครอบคลุมพื้นผิวโลก ในมาตราส่วนต่าง ๆ ตามความเหมาะสม และสามารถนำไปซ้อนทับในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ [15] เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ มีองค์ประกอบทั้ง 5 องค์ประกอบ คือ

3.5.1 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (Hardware) คือ เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ เช่น Digitizer, Plotter, Printer เป็นต้น หน้าที่หลักของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์คือ หน่วยรับข้อมูล หน่วยประมวลผลกลาง และ หน่วยแสดงผล

3.5.2 โปรแกรม (Software) คือ ชุดของคำสั่งที่สามารถสั่งให้ระบบทำงานได้ เช่น โปรแกรมสำเร็จรูป ARCVIEW ARCGIS ARCMAP เป็นต้น ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการนำเข้า การจัดเก็บ และการวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.3 ข้อมูล (Data) ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยจะถูกจัดเก็บในรูปแบบของฐานข้อมูล ซึ่งประเภทข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) หรือข้อมูลภาพกราฟิก และข้อมูลเชิงอรรถาธิบาย (Attribute Data) โดยแสดงในรูปตัวเลข ตัวอักษร หรือสัญลักษณ์ ข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลคุณลักษณะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันรวมอยู่ในลักษณะของข้อมูลพื้นที่

3.5.4 บุคลากร (People Ware) คือ ผู้ที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วยบุคลากรหลายฝ่าย อาทิเช่น ฝ่ายบันทึกข้อมูล ฝ่ายเทคนิค ฝ่ายวิเคราะห์ ข้อมูล ฝ่ายบริหาร ซึ่งบุคลากรเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

3.5.5 กระบวนการทำงาน (Process) คือ การกำหนดขั้นตอนในการทำงานให้สอดคล้องกัน แต่ละขั้นตอนมีกระบวนการที่แตกต่างกัน ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดมาตรฐานขององค์กรและรองรับการทำงานได้อย่างเป็นปกติ

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การกำหนดปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน คาร์บอนเครดิตเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษจากทั่วโลก ในประเทศไทยรัฐบาลได้ให้การสนับสนุนและออกพระราชบัญญัติจัดตั้งองค์กรขึ้นมา เพื่อช่วยในการขับเคลื่อนคาร์บอนเครดิต โดยมีชื่อว่า องค์กรการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ซึ่งมีหน้าที่ในการกำกับดูแลขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องทางด้านคาร์บอนเครดิตในภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ องค์กรดังกล่าวยังมีข้อจำกัดและยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากมีการรับรู้ในกลุ่มที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ดังนั้น เพื่อรองรับการขยายตัวทางด้านคาร์บอนเครดิต จึงควรมีการพัฒนาการจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อตอบสนองต่อตลาดคาร์บอนเครดิตในอนาคต ซึ่งเป็นตลาดที่เปิดกว้างทั่วโลก

4.2 การวิเคราะห์

จากปัญหาข้างต้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ความต้องการได้ ดังนี้

4.2.1 ระบบเพื่อการบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทาน

4.2.2 ระบบฐานข้อมูลที่ใช้งานง่าย ปลอดภัย สะดวกในการเข้าถึงข้อมูลได้ตลอดเวลา

4.2.3 การแสดงผลข้อมูลที่ใช้งานง่าย ถูกต้อง และแม่นยำ

4.2.4 ความสะดวกในการสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ใช้งาน โดยต้องมีความทันสมัยและมีค่าบริการต่าง ๆ ที่เหมาะสม

4.2.5 ระบบความปลอดภัยต่าง ๆ ในการเข้าใช้งานระบบ

4.2.6 ใช้ต้นทุนในการพัฒนาไม่สูง เน้นโปรแกรมที่มีลักษณะเป็น Free License

4.3 การออกแบบ

จากข้อมูลที่ได้ในการวิเคราะห์ จึงได้ออกแบบระบบมีรายละเอียด ดังนี้

4.3.1 พัฒนาระบบเป็นแบบ Windows Application เป็นระบบปฏิบัติการมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลาย

4.3.2 ระบบฐานข้อมูลแบบ Cloud Database บน MySQL Server (Free License) เป็นฐานข้อมูลที่มีการใช้งานแพร่หลาย และไม่มีค่าใช้จ่ายลิขสิทธิ์ของระบบฐานข้อมูล

4.3.3 ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ GIS โดยแสดงข้อมูลแผนที่ผ่าน Google Map (Free License) เป็นแผนที่ที่ได้รับความนิยม และมีความทันสมัยของรูปถ่าย

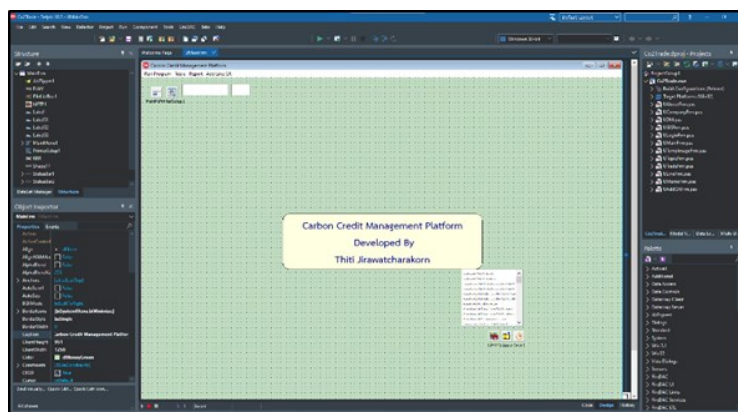
4.3.4 การสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้ใช้งาน ใช้การส่งผ่าน Application Line เป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สะดวกในการใช้ติดต่อสื่อสาร

4.3.5 การจัดทำรายงานต่าง ๆ ในระบบใช้งานผ่าน Microsoft Excel เป็นโปรแกรมที่ผู้ใช้งานส่วนใหญ่สามารถใช้งานได้ และสะดวกในการแก้ไขแบบรายงานได้ง่ายและรวดเร็ว

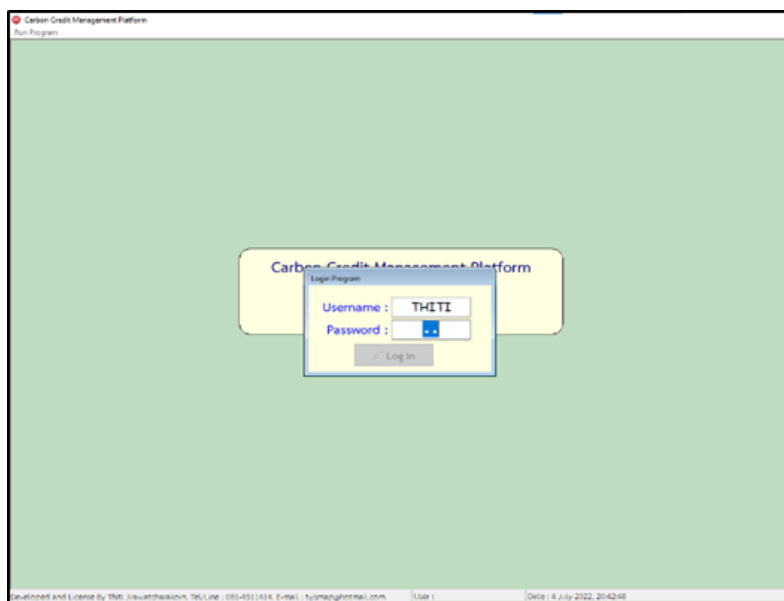
4.3.6 มีระบบการเข้าใช้งานก่อนเข้าระบบทุกครั้ง เพื่อยืนยันการเข้าใช้งานและบันทึกประวัติการเข้าใช้งานระบบ เพื่อตรวจสอบการเข้าใช้งานย้อนหลัง

4.4 การพัฒนาและทดสอบ

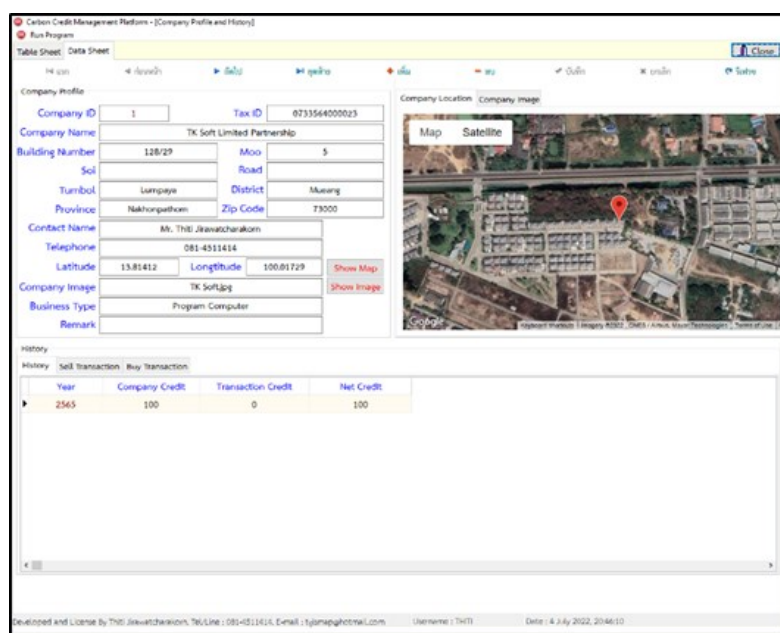
ในส่วนของการพัฒนาระบบ จะใช้โปรแกรม Delphi 10.3.3 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาหลักและใช้ Library Google Map ในการแสดงผลแผนที่ต่าง ๆ ทำการเชื่อมต่อระบบฐานข้อมูล MySQL Server ไปที่ Server ที่ให้บริการ โดยผู้วิจัย เป็นผู้ดำเนินการพัฒนาระบบเองทั้งหมด ดังแสดงตามรูปที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 1 หน้าจอเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา



รูปที่ 4 หน้าจอหลักของระบบพร้อมการยืนยันการเข้าใช้งาน



รูปที่ 5 หน้าจอแสดงรายชื่อบริษัทพร้อมตำแหน่งที่ตั้งบน Google Map

Carbon Credit Management Platform : (Carbon Credit Trading System)

Run Program

Enter User :

Tab: All Transaction | Sell Transaction | Buy Transaction

Transaction ID	Transaction Date	Type	Seller ID	Buyer ID	Credit	Price/Unit	Total Price	Status
220702-1340	02/07/2022	Sell	1		50	500	25000	Waiting
220702-1338	02/07/2022	Buy		1	100	100	10000	Waiting

Add Transaction

Transaction ID: 220702-1340 Date: 02/07/2022

Type: Sell

Seller ID: 1 TK Soft Limited Partnership

Buyer ID:

Offer Credit: 50 Price/Unit: 500

Total Price: 25000 Baht

Remark:

Status: Waiting

Developed and Licensed By: Thiti Jirawatcharakorn, Tel/Line : 081-4511414, E-mail : tjirawatchar@gmail.com Username : Thiti Date : 4 July 2022, 20:11:31

รูปที่ 6 หน้าจอแสดงรายการซื้อขายคาร์บอนเครดิต

Contact

Message : Count : 0 character

Status :

Send Message

รูปที่ 7 หน้าจอการส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานผ่าน Application Line

Company ID : 1 Tax ID : 0733564000023

Company Name : TK Soft Limited Partnership

Building Number : 128/29 Moo : 5

Soi : Road :

Tumbol : Lumpaya District : Mueang

Province : Nakhonpathom Zip Code : 73000

Contact Name : Mr. Thiti Jirawatcharakorn Tel : 081-4511414

Business Type : Program Computer

Remark :

Transaction ID	Date	Type	Credit	Price/Unit	Total Price	Status
220702-1340	02/07/2022	Sell	50	500	25000	Waiting
220702-1338	02/07/2022	Buy	100	100	10000	Waiting

รูปที่ 8 หน้าจอแสดงรายงานต่าง ๆ บนโปรแกรม Microsoft Excel

4.5 การติดตั้งระบบ

ทำการติดตั้งโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ในระบบปฏิบัติการแบบ Windows 10 และเปิดใช้งานระบบบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานให้กับกลุ่มตัวอย่างได้ทดลองเข้าใช้งาน โดยมีการกำหนดชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่านพื้นฐาน โดยผู้วิจัยได้มีการนำเสนอและแนะนำวิธีการใช้งานพื้นฐาน หลังจากนั้นให้กลุ่มตัวอย่างใช้งานได้ทดลองการใช้งานตามปกติ จากนั้นได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล และการให้คะแนนประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทาน

5. ผลการวิจัย

จากการประเมินโดยใช้แบบสัมภาษณ์ในหัวข้อประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตใน โซ่อุปทาน ซึ่งมีการให้คะแนนความพึงพอใจ (1-5) โดยกลุ่มตัวอย่างมาจากการคัดเลือกโดยเฉพาะเจาะจง จำนวน 21 คน (ผู้กำหนดทางด้านนโยบายคาร์บอนเครดิตแห่งชาติ จำนวน 7 คน ผู้เชี่ยวชาญด้านคาร์บอนเครดิต จำนวน 7 คน และนักธุรกิจที่มีข้อมูลเชื่อมโยงกับคาร์บอนเครดิต จำนวน 7 คน) ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าสถิติพื้นฐาน คือ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของระบบบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานฯ

ชื่อรายการ	X	S.D.	ความพึงพอใจ
1. ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (ออกแบบ, อักษร, สี)	4.33	0.46	มาก
2. ความง่ายในการใช้งาน	3.87	0.32	มาก
3. ระบบข้อมูลบริษัท	4.33	0.46	มากที่สุด
4. ระบบการซื้อขาย	4.60	0.47	มากที่สุด
5. ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์	4.93	0.24	มากที่สุด
6. ความเร็วในการทำงานของระบบ	4.53	0.48	มากที่สุด
7. การนำระบบไปใช้งานจริง	3.93	0.43	มาก

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความพึงพอใจในระดับมาก ($\bar{x}=4.36$) โดยเรียงตามคะแนนความพึงพอใจในประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ จากมากไปน้อย ตามลำดับได้ ดังนี้ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ($\bar{x}=4.93$) ระบบการซื้อขาย ($\bar{x}=4.60$) ความเร็วในการทำงานของระบบ ($\bar{x}=4.53$) ระบบข้อมูลบริษัท ($\bar{x}=4.33$) ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface) ($\bar{x}=4.33$) การนำระบบไปใช้งานจริง ($\bar{x}=3.93$) และความง่ายในการใช้งาน ($\bar{x}=3.87$)

ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทาน โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการบริหารจัดการคาร์บอนเครดิตในโซ่อุปทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถต่อยอด หรือพัฒนาเพิ่มเติมได้ ตามความต้องการที่เพิ่มขึ้นของการบริหารจัดการ

7. ข้อเสนอแนะ

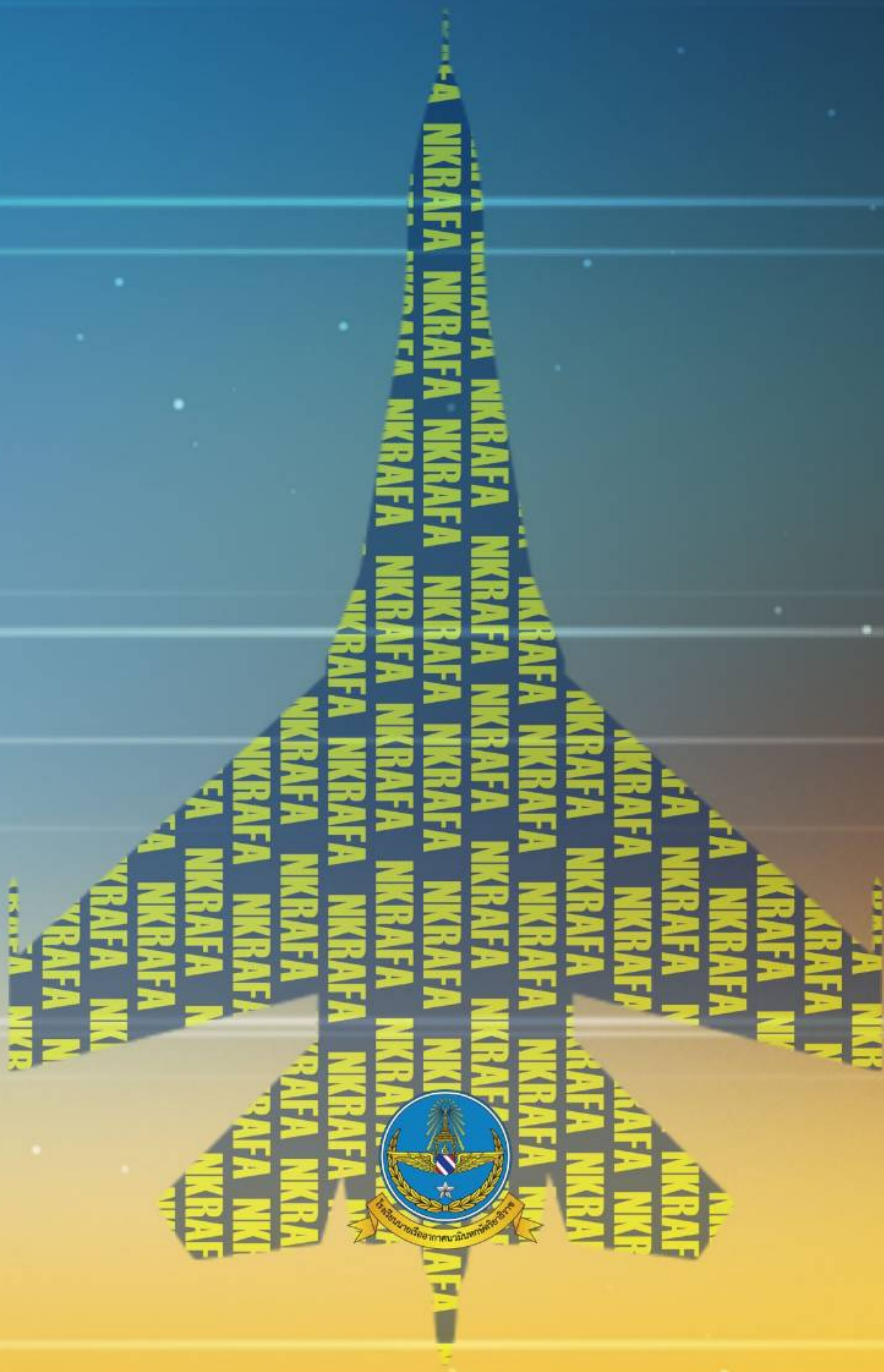
เนื่องจากข้อมูลค่าคาร์บอนเครดิตต่าง ๆ ในปัจจุบันยังมีไม่มาก และจำกัดอยู่ในกลุ่มบริษัทที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น ข้อมูลในการทดลองระบบดังกล่าว จึงเป็นข้อมูลสมมุติขึ้นในการทดสอบระบบ ซึ่งอาจทำให้การใช้งานยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้น หากมีการนำค่าข้อมูลหรือหน่วยงานต่าง ๆ จริงในการใช้งานจะทำให้การบริหารจัดการต่าง ๆ มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งค่าและข้อมูลทั้งหมดมาจากองค์กรภาครัฐที่มีหน้าที่ในการบริหารจัดการค่าคาร์บอนเครดิต ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิ จึงต้องมีการตรวจสอบและประสานงานข้อมูลให้ถูกต้อง

ระบบบริหารจัดการค่าคาร์บอนเครดิต สามารถนำไปใช้ดำเนินงานธุรกิจที่เกี่ยวข้องได้หลากหลาย และสามารถพัฒนาต่อยอดเป็นตลาดคาร์บอนเครดิตเครดิตได้ โดยธุรกิจด้านคาร์บอนเครดิตกำลังเป็นที่นิยม และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงรวมไปถึงยังไม่ค่อยมีการแข่งขัน จึงเป็นโอกาสให้แกผู้ที่สนใจที่จะเริ่มประกอบธุรกิจทางด้านคาร์บอนเครดิตใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินธุรกิจต่อไปได้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). ภาวะเรือนกระจก. Retrieved on March 10, 2022, from <http://climate.tmd.go.th/content/article/10>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2565). รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม. Retrieved on March 10, 2022, from <http://www.onep.go.th/>
- [3] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2565). ตลาดคาร์บอนคืออะไร. Retrieved on May 5, 2022, from <http://carbonmarket.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y29uY2VwdF9tYXJrZXQ=>
- [4] Government, T. (1997). Royal Decree establishing the Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization) BE 2550. Retrieved on May 15, 2022, from <https://policy.asiapacificenergy.org/node/3999>
- [5] United Nation Climate Change. (2015). Race to Zero Campaign. Retrieved on May 15, 2022, from <https://unfccc.int/climate-action/race-to-zero-campaign>
- [6] The Union of Concerned Scientists. (2013). Retrieved on March 22, 2022, from <https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>
- [7] Fullarton, A. R. (2016). Renewable Energy Credits as Tax Deductions: Tax Accounting for the Renewable Energy (Electricity) Act 2000. Retrieved on May 5, 2022, from https://www.academia.edu/34794405/Renewable_Energy_Credits_as_Tax_Deductions_Tax_Accounting_for_the_Renewable_Energy_Electricity_Act_2000
- [8] Government, T. (2011). Royal Decree on Tax Exemption B.E. 2554. No. 514. May 15, 2022, from <https://www.rd.go.th/publish/fileadmin/>
- [9] Dong, Y. H. a. F. (2019). China's Carbon Market Development and Carbon Market Connection. *MDPI Journals*, 12(9): 1663.
- [10] Sebastian Lang, M. B. S. L. (2018). What future for the voluntary carbon offset market after Paris? An explorative study based on the Discursive Agency Approach. *Climate Policy*. *Climate Policy*. 19: 414 - 426.
- [11] Ministry of Energy. (2019). Alternative Energy. *Annual Report 2015*. Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Ministry of Energy. Bangkok: Thailand.

- [12] Organization, T. G. G. M. O. P. Carbonmarket. (2019). Retrieved on March 10, 2022, from <http://carbonmarket.tgo.or.th/>.
- [13] Ahmad Rezaee, F. D., Behnam Fahimnia and Benita Beamon. (2015). Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price. *Ann Oper Res*. 250: 463 - 485.
- [14] Tongkaw, S. (2017). GIS Application Management for Disabled People. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 226, International Research and Innovation Summit (IRIS2017) 6 -7 May 2017, Melaka: Malaysia.
- [15] อรรถพล อินทรสุวรรณ, ปกรณ์ เมฆแสงสวย และ สถาพร มนต์ประภัตร. (2561). การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพการให้บริการไปรษณีย์: กรณีศึกษาจังหวัดกาญจนบุรี. *วารสารอักษรศาสตร์*. 47(1) : 345-376. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.



Published by

Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

www.nkrafa.ac.th/journal