

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 44 Number 3 May - June 2025

ISSN (Print) : 2985-2617
ISSN (Online) : 2985-2625

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพของนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ โดยเผยแพร่บทความวิจัย (research article) บทความปริทัศน์ (review article) ในสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์ 0-4371-9827

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ไบไม่
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมพรพรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิชา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิษณุ กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานเป็รื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงศ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน กูวรรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกสัชกร ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

פקตร์วิไล จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสิษฐ์

กำหนดเผยแพร่

ปีละ 6 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์
ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม-สิงหาคม
ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

ภาพปกของฉบับนี้คือ ฐปฤษา (*Typha angustifolia* L.) เป็นชื่อสามัญของพืชชนิดนี้ที่คนทั่วไปทราบ ยังมีชื่อท้องถิ่นอื่นอีกแต่ไม่ค่อยรู้จักกันโดยทั่วไป ฐปฤษา เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีอายุหลายปี เป็นวัชพืชนิดหนึ่งของไทยในบรรดาวัชพืชที่มีอยู่หลากหลาย มองใน 3 มิติ ได้แก่ การพัฒนาอย่างยั่งยืน ประชาชนเศรษฐกิจพอเพียง และโมเดล BCG จะเกิดมุมมองใหม่ที่เคยมองว่าวัชพืชอบอย่าง ฐปฤษา เป็นสิ่งที่ต้องกำจัดออกไปจากพื้นที่เพาะปลูก หรือที่อยู่อาศัย มุมมองใหม่เกิดขึ้นจากงานวิจัย หรือนวัตกรรม เกิดขึ้นมากมายภายใต้มิติทั้ง 3 มิติ ได้แก่ ละอองเรณูของพืชชนิดนี้มีคุณสมบัติทางการแพทย์ โรค ต้น ฐปฤษา เจริญเติบโตได้ในแหล่งน้ำเสียจึงสามารถช่วยบำบัดน้ำเสีย ต้น ฐปฤษา มีระบบรากช่วยป้องกันการพังทลายของดินตามชายน้ำได้ ต้น ฐปฤษา มีความสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสีย และมีงานวิจัยอื่นที่ใช้ในการบำบัดหรือส่งเสริมในระบบนิเวศอีกมากมาย ทั้งมีการใช้ประโยชน์จากลำต้นสร้างเป็นผลิตภัณฑ์จักสานที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น ส่งผลทำให้วัชพืชนิดนี้บทบาทด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต ฐปฤษา จึงเป็นวัชพืชที่เป็นพืชต้นแบบอีกชนิดหนึ่งที่ยังต้องใช้แนวคิด เวลา และเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่จะใช้ประโยชน์ในมิติต่างๆ ในอนาคตต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ประเทพา
บรรณาธิการ



สารบัญ

Agricultural Science

- องค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของเปลือกผลกาแฟ 200
Chemical composition, antioxidant activity and volatile compound of cherry coffee pulp
ภัทรภร ภควีระชาติ, ชนิตา ป้อมเสน, นิชุพยาน นิเมมิ่ง และ ศศธร สิงขรอาจ
Pattarabhorn Pakaweerachat, Chanida Pomsen, Nisufyan Nimaming and Sasathorn Singkhornart

Biological Science

- ความหลากหลายชนิดและมูลค่าทางเศรษฐกิจของพืชวงศ์แตงในพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา 211
Species diversity and economic value of cucurbitaceae in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province
จุฑาทพร มุสิมุล, สันติ วัฒนฐานะ และ หนูเดือน เมืองแสน
Chuthapond Musimun, Santi Watthana and Nooduan Muangsan

- ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีท *Streptomyces* sp. PM-R01 ที่แยกได้จากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดจันทบุรี 221
Antibacterial activity of endophytic actinomycetes, *Streptomyces* sp. PM-R01, isolated from native durian varieties
in Chanthaburi province
วิญญู ภัคดี และ จิรภัทร จันทมาลี
Winyou Puckdee and Jirapat Chanthamalee

- ผลของการทดแทนเนื้อไก่ด้วยผงดักแด้ไหมในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวกรอบจากเนื้อไก่ 230
Effects of substituting chicken with silkworm pupae powder in crispy chicken snack products
ตรีทิพย์ ชินสันต์, นิตยา ภูงาม, ชญาภา บัวน้อย และ ณัฐาลินคณล เศรษฐปราโมทย์
Threethip Chuensun, Nittaya Phungam, Chayarpap Buano and Natwalinkhol Settapramote

- ไม้กลายเป็นหินสกุล *Agathoxylon* ในเส้นทางศึกษาธรรมชาติแหล่งซากดึกดำบรรพ์ไม้กลายเป็นหินภูโป อำเภอด่านช้าง 241
Petrified wood of the genus *Agathoxylon* on the nature trail at Phu Por fossil site, Kham Muang District, Kalasin Province, Thailand
ภณิษดา ศรีคำภา และ สุรเวช สุธีธร
Phanitada Srikampa and Suravech Suteethorn

Computer and Information Technology

- การพัฒนาแบบจำลองรู้จำใบหน้าแมวด้วยการเรียนรู้เชิงลึก 251
A development of cat face recognition model using deep learning
ภัทรพล ศรีรักษ์, จิติมนต์ อังสกุล และ ธรา อังสกุล
Pattarapol Srirak, Jitimon Angskun and Thara Angskun

Engineering

- การจัดทำแผนที่ด้วยความละเอียดสูง เพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ 262
High-Resolution mapping for wind energy potential assessment in Chaiyaphum Province
ภูษิตพงษ์ พิพมาจันทร์, สุภชัย พลน้ำเที่ยง, สุพิชชา ทวีลไพร และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต
Puchitpong Pimpajan, Supachai polnumtiang, Supitcha Tawinprai and Kiatfa Tangchaichit

- ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 274
โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม
Factors affecting tensile-shear strength properties of lap joints between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel
using gas metal arc welding process
อมรศักดิ์ ไม้ใหญ่, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, พีรเดช สุวิทย์อารักษ์ และ วีระพล ทับทิมดี
Amornsak Mayai, Narongsak Thammachot, Peeradaech Suwittayaruk and Weerapol Taptimdee

- สมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมรังไหม 285
Mechanical properties and biodegradation of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites
กนกอร นุ้ยเล็ก, ณัฐกฤตา ประเสริฐโสภา และ อิงอร สิทธิธนาอด
Kanokon Nuilek, Natkrita Prasoesopha and Ing-orn Sittitanadol

Mathematics

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนในตัวแปรตามสำหรับตัวแบบการจำแนก 294
Comparison of the efficiency of noise handling methods in dependent variable for classification model
กฤษฏี ศิริเรือง และ ประภาศิริ รัชชประภาพรกุล
Kritsadee Siriruang and Prapasiri Ratchaprapapornkul

องค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของเปลือกผลกาแฟ

Chemical composition, antioxidant activity and volatile compound of cherry coffee pulp

ภัทรภร ภาควิระชาติ¹, ชนิตา ป้อมเสน², นิซุฟยาน นิมะมิง¹ และ ศศธร สิงขรอาจ^{1*}

Pattarabhorn Pakaweerachat¹, Chanida Pomsen¹, Nisufyan Nimaming¹ and Sasathorn Singkhornart^{1*}

Received: 24 May 2024 ; Revised: 14 June 2024 ; Accepted: 31 July 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ความสามารถในการออกฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบสารหอมระเหยในเปลือกกาแฟพันธุ์โรบัสต้า และอาราบิก้า จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่าพันธุ์อาราบิก้า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้าของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ามากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า ยิ่งไปกว่านั้นเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟอาราบิก้ามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการออกฤทธิ์การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH (radical scavenging assay) มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณและผลการออกฤทธิ์ในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟโรบัสต้า ในขณะที่ค่าการออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ABTS (cation radical scavenging assay) และ FRAP (Ferric reducing antioxidant power) ของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า มีค่าการออกฤทธิ์มากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้ง 2 พันธุ์มีค่าไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณคาเฟอีน และกรดคลอโรจินิกในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ายังสูงกว่าโรบัสต้าเล็กน้อย จากการวิเคราะห์สารหอมระเหยด้วยเครื่อง GC-MS พบว่ามีสารหอมระเหยทั้งหมด 32 ตัว สารหอมระเหยที่มีมากที่สุด คือ phenol 54.78% และคาเฟอีน (caffeine) 12.90% แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีสารหอมระเหยที่น่าสนใจคือ borneol และ turmerone ซึ่งให้กลิ่นรสพิเศษในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟโรบัสต้าเท่านั้น ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้งโรบัสต้า และอาราบิก้ามีสารต้านอนุมูลอิสระอยู่จำนวนมากและมีสารสำคัญที่สามารถเป็นแนวทางการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร เพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้งโรบัสต้า และอาราบิก้าต่อไป

คำสำคัญ: เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ, สารต้านอนุมูลอิสระ, สารหอมระเหย

Abstract

This research aimed to study the chemical composition, the number of antioxidants, antioxidant activity, and volatile compounds of Robusta and Arabica cherry coffee pulp. According to the analysis of the chemical composition, it was found that the cherry coffee pulp of Robusta coffee cherry has a higher carbohydrate content than the Arabica cherry coffee pulp. The amounts of protein, fat, dietary fiber, and ash of the Arabica cherry pulp coffee were higher than those of the Robusta cherry pulp coffee. Moreover, the Arabica cherry pulp coffee has a phenolic compound content and DPPH antioxidant activities that were also higher in comparison with the Robusta cherry coffee pulp, while the values of ABTS (cation radical scavenging assay) antioxidant activity and FRAP (ferric reducing antioxidant power) of Robusta cherry pulp coffee were lower. The amount of anthocyanin in both of the two varieties of coffee cherry pulp has no different. In addition, the caffeine and chlorogenic acid content in Arabica coffee cherry pulp was slightly higher than in Robusta. According to the analysis of volatile compounds with the GC-MS method, there were a total of 32 volatiles. The most volatile compounds were found to be phenol (54.78%) and caffeine (12.90%), but they

¹ สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹ Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, 10120

² Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, 10120

* corresponding author: sasathorn.s@mail.rmutk.ac.th

also discovered borneol and turmerone, which give only the Robusta coffee cherry pulp a special flavor. The results revealed that both Robusta and Arabica coffee cherry pulp contain large amounts of antioxidants and important bioactive compounds that can guide development of the utilization of agricultural waste, which value-added the cherry pulp of both Robusta and Arabica coffee.

Keywords: Cherry coffee pulp, antioxidant activity, volatile compound

บทนำ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่นิยมบริโภคกันมาก ส่วนใหญ่ในประเทศไทย มีทั้งพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้า แม้สายพันธุ์ของกาแฟมีอยู่มากกว่า 6,000 สายพันธุ์ทั่วโลก แต่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ อาราบิก้า (Arabica coffee) และโรบัสต้า (Robusta coffee) โดยการปลูกกาแฟ 2 สายพันธุ์นี้มีปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในประเทศไทยการปลูกกาแฟพันธุ์อาราบิก้านิยม ปลูกทางภาคเหนือเพาะปลูกมากแถบจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน และตาก ซึ่งเป็นพื้นที่สูงกว่าระดับน้ำทะเลและอากาศเย็น ส่วนโรบัสต้ายอดนิยมปลูกทางภาคใต้ ซึ่งเพาะปลูกมากแถบจังหวัดชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี กระบี่ และนครศรีธรรมราช ปัจจุบันเกษตรกรในเขตภาคตะวันตกของประเทศไทยที่มีสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศใกล้เคียงกับภาคใต้ แต่เป็นที่หุบเขาสูงและอากาศหนาวเย็นเหมือนภาคเหนือทำให้โดยเฉพาะจังหวัดกาญจนบุรี จึงสามารถเพาะปลูกกาแฟทั้งสองพันธุ์ได้ดี และเกษตรกรได้รับการสนับสนุนให้ปลูกกาแฟมากขึ้น ทำให้ในกระบวนการผลิตและแปรรูปกาแฟ มีวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากซึ่งหลักๆ ได้แก่ เนื้อเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ (cherry coffee pulp) คือ ประมาณร้อยละ 55 ของผลสด และเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ (hull and husk) ประมาณร้อยละ 29 ของผลสด (Shahidi & Naczka, 2003) ซึ่งโดยทั่วไปส่วนเนื้อผล เชอร์รี่กาแฟนี้จะถูกนำไปหมักก่อนที่จะทำเป็นปุ๋ย กลุ่มเกษตรกรจึงมักจะทิ้งเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟให้หมักเองตามธรรมชาติ และนำไปทำเป็นปุ๋ยสำหรับต้นกาแฟในไร่ อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า ปุ๋ยที่ได้จากการหมักเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟให้ผลได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากในเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟมีสารประกอบบางชนิด เช่น สารประกอบ ฟีนอล คาเฟอีน และสารแทนนิน (Ramirez-Martinez, 2006) ซึ่งจะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ช่วยในการหมักปุ๋ย นอกจากนี้การนำเศษเหลือทิ้งของเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟมีองค์ประกอบของสารประกอบ ฟีนอล คาเฟอีน และแทนนินในปริมาณสูง ซึ่งจะยับยั้งการดูดซึมสารอาหารของสัตว์ ทำให้สัตว์ไม่สามารถใช้สารอาหารในเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟได้เต็มที่ (Rojas *et al.*, 2002) มีรายงานว่าเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟเป็นหนึ่งในแหล่งของสารต้านออกซิเดชันที่สำคัญ เนื้อผลเชอร์รี่กาแฟมีสารประกอบฟีนอลเป็น

องค์ประกอบในรูปของกรดคลอโรจีนิค (chlorogenic acid) และสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์อยู่สูง (Dimitrios, 2006) โดยรายงานของ Ramirez-Martinez (2006) พบว่ามีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟ มีกรดคลอโรจีนิค และอิพิคาเทชิน (epicatechin) อยู่สูงถึงร้อยละ 42.2 และ 21.6 ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดตามลำดับ ซึ่งมนุษย์นิยมบริโภคกาแฟเป็นจำนวนมากอยู่แล้ว และสารออกฤทธิ์ในเนื้อผลเชอร์รี่กาแฟที่กล่าวมาข้างต้นมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสามารถลดอัตราการเสี่ยงของการเกิดโรคหลายชนิดและมีรายงานว่า มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าชาหลายเท่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการเปลือกกาแฟเชอร์รี่ในจังหวัดกาญจนบุรี ที่น่าจะมีสารประกอบที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ แต่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จึงศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และสารหอมระเหยในเปลือกกาแฟเชอร์รี่พันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้าเพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่ากับส่วนที่เหลือทิ้งจากการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ

เมล็ดกาแฟผลสดพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้า จากวิสาหกิจชุมชนกาแฟทองผาภูมิ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ในช่วงฤดูการการเก็บเกี่ยวกาแฟเดือนพฤศจิกายน – เมษายนของทุกปี ผลเมล็ดกาแฟสีแดงสุกถูกนำมาสีเปียก (wet process) แยกเอาเฉพาะเนื้อและเปลือกผลเชอร์รี่ที่หุ้มเมล็ดกาแฟ (cherry coffee pulp) ออกมาจากเมล็ดกาแฟ (green bean) เข้าสู่กระบวนการผลิตกาแฟต่อไป ส่วนเนื้อและเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟที่ถูกสีออกมา จะถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนมีความชื้นคงที่ จากนั้นนำไปบด และร่อนแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช นำผงตัวอย่างกาแฟที่ได้จากการทำแห้ง 1 กรัม มาละลายเอทานอล 10 มิลลิลิตร สกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic extraction) โดยใส่สารละลายตัวอย่างใน ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปั่นแยกตะกอนออกด้วยเครื่อง centrifuge ความเร็ว 8,000 x g ที่อุณหภูมิ 4°C นาน 15 นาที นำส่วนของเหลวใสด้านบนมาวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

และสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity, ABTS radical scavenging activity และ Ferric reducing antioxidant power ต่อไป

2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis) ของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โยอาหาร ใย ความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2019)

3. วิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสารสำคัญในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ

3.1 วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compound)

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดดัดแปลงจากวิธีของ Singleton and Rossi (1965) โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมผสมกับ 10% folin-ciocalteu phenol reagent ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติม 7.5% โซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 80 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 90 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณปริมาณสารฟีนอลิก โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก ความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร คำนวณปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของตัวอย่างในเทอมของมิลลิกรัมสมมูลย์กรดแกลลิกต่อน้ำหนักตัวอย่าง 1 กรัม (Gallic acid equivalent; GAE) ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง เติม 10% folin-ciocalteu phenol reagent และ 7.5% โซเดียมคาร์บอเนต เช่นเดียวกับตัวอย่างเป็นสารละลายแบลนด์ (blank)

3.2 วิเคราะห์สารแอนโทไซยานินด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC-DAD)

ชั่งน้ำหนักเปลือกเชอร์รี่กาแฟบด 0.5 กรัม ผสมกับสารละลายผสมเอทานอลกับ 0.1 โมลาร์ HCl (85:15 โดยปริมาตร) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร นำไปสกัดด้วยเครื่อง sonicator ที่อุณหภูมิ 80 °C 30 นาที จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมครอน (Agilent captiva premium syringe filter, regenerated cellulose, 0.45 µm, 25 mm, p/n 5190-5111) เพื่อให้อยู่ในรูปของ Cyanidin-3-Glucoside ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC (HPLC-DAD, Agilent 1200 series, Diode-Array Detector, auto injector) โดยใช้ คอลัมน์ Mightysil C18 column (150 × 4.6) particle เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 ไมครอน (Kanto chemical, Japan) ใช้ สภาวะในการแยกแบบ Gradient ด้วยสารละลาย 0.1 M TFA ในน้ำ (A) กับ อะซิโตรไนไตร (B) โดยที่เวลา 0 – 5 นาที ความเข้มข้น B เท่ากับ 5%, เวลา 5 – 25 นาทีความเข้มข้น B เท่ากับ 5 - 95%, เวลา 25 – 35 นาทีความเข้มข้น B เท่ากับ 95%, เวลา 35 – 35.1 นาทีความเข้มข้น B เท่ากับ

95 - 5% และเวลา 35.1 – 45 นาทีความเข้มข้น B เท่ากับ 5% ฉีดตัวอย่าง ปริมาตร 20 ไมโครลิตร อุณหภูมิ 60 °C ตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร เตรียมสารมาตรฐาน cyanidin-3-glucoside ละลายในสารละลายผสมเอทานอล 0.1 โมลาร์ HCl ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร (85:15 โดยปริมาตร) ที่ความเข้มข้น 100 400 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีการเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

3.3 วิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีน (Caffeine) และกรดคลอโรจินิก (chlorogenic acid)

เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟบดที่เตรียมไว้ 0.5 กรัม และ MgO 5 กรัม กวนผสมกับน้ำ 200 มิลลิลิตร ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 90°C เป็นเวลา 20 นาที และทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง สารละลายที่เตรียมนำไปกรองด้วยตัวกรองเซลลูโลส ขนาด 0.45 ไมครเมตร, 25 มิลลิเมตร, p/n 5190-5111 และฉีดเข้าเครื่อง HPLC วิเคราะห์ทันที สารละลายมาตรฐานคาเฟอีน 1.0 มิลลิกรัม และคลอโรจินิก 0.8 มิลลิกรัม ถูกเตรียมด้วยวิธีเดียวกัน ทำ 3 ซ้ำ ปริมาณคาเฟอีนและกรดคลอโรจินิก วิเคราะห์โดยเครื่อง reversed-phase HPLC system, (Agilent 1200series, Diode-Array Detector) (150 × 4.6-mm I. D.), คอลัมน์ชนิด Mightysil C18 column ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ไมโครเมตร ใช้เฟสเคลื่อนที่ชนิดเดียวคือ 25% MeOH ในน้ำ (v/v) ที่อัตราการไหลคงที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที นาน 15 นาที โดยใช้ปริมาณสารละลาย 10 ไมโครลิตร ที่อุณหภูมิคอลัมน์ที่ 25°C. ตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 272 นาโนเมตร

3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติการออกฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ

1) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH•) scavenging activity Assay

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระ โดยเปิดสารสกัดเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟปริมาตร 50 ไมโครลิตร กับสารละลาย 0.1 มิลลิโมลาร์ DPPH• 150 ไมโครลิตร ลงใน 96-well polystyrene microplate ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader (TECAN model Infinite M200) ได้ค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง (A sample) โดยใช้เมทานอลเป็น negative control (A blank) และใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน คำนวณหาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันจากสูตรคำนวณความสามารถในการยับยั้งอนุมูล DPPH• ดังสมการ

DPPH radical scavenging effect (%)

$$= \frac{A \text{ Blank} - (A \text{ Sample} + A \text{ Control})}{A \text{ Blank}} \times 100$$

A Blank

โดยที่

A Control คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ control (น้ำกลั่น + DPPH•)

A Blank คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (ตัวอย่าง + เอทานอล)

A Sample คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (ตัวอย่าง + DPPH•)

ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สร้างกราฟระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูล DPPH กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Trolox และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมของตัวอย่างเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ (mg Trolox equivalence /g sample)

2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP Assay)

เตรียมสารละลาย FRAP โดยผสมสารละลาย acetate buffer เข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ (pH = 3.6) สารละลาย FeCl₂·6H₂O เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ และสารละลาย TPTZ 10 มิลลิโมลาร์ ใน HCl 40 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วน 10:1:1 ตามลำดับ ผสมสารละลายสารสกัดเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ 50 ไมโครลิตร กับสารละลาย FRAP 150 ไมโครลิตร ใน 96-well polystyrene microplate ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร เมตร ด้วยเครื่อง microplate reader ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายของสารละลายมาตรฐาน Trolox (0.02-0.10 มิลลิโมลาร์) และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ (mg Trolox equivalence /g sample)

3) วิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS•+) radical scavenging Assay

เตรียมสารละลาย ABTS•+ โดยผสมสารละลาย 7 มิลลิโมลาร์ ABTS•+ กับสารละลาย 2.45 มิลลิโมลาร์ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตอัตราส่วน 2:1 บ่มไว้ในที่มืดเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง และเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ในช่วง 0.70 ± 0.03 นาโนเมตร จากนั้นวิเคราะห์ประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS•+ โดยปิเปตสารสกัดเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร กับสารละลาย ABTS•+ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ใน 96-well polystyrene microplate ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader คำนวณความสามารถในการยับยั้งอนุมูล ABTS•+ ดังสมการ

ABTS radical scavenging effect (%)

$$= \frac{A_{\text{Blank}} - (A_{\text{Sample}} + A_{\text{Control}})}{A_{\text{Blank}}} \times 100$$

โดยที่

A Control คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ control (น้ำกลั่น + ABTS•+)

A Blank คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (ตัวอย่าง + เอทานอล)

A Sample คือ ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง (ตัวอย่าง + ABTS•+)

ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สร้างกราฟระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูล ABTS กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Trolox และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมของตัวอย่างเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ (mg Trolox equivalence /g sample)

4. การวิเคราะห์สารหอมระเหย (volatile compounds) ด้วยเครื่อง GC-MS

วิเคราะห์สาร volatile compounds ด้วย solid phase micro extraction gas chromatography-mass spectrometry (SPME GC-MS) โดยวิเคราะห์ตัวอย่าง 2 แบบ คือ การวิเคราะห์ตัวอย่างแห้ง (CPR และ CPA) และตัวอย่างสารละลาย (CPR + H₂O, CRA + H₂O) โดยนำตัวอย่าง 1 กรัม แช่ในน้ำ 2 มิลลิลิตร และใช้ไฟเบอร์ DVB/CAR/PDMS ดูดซับไอระเหยที่อุณหภูมิ 60 °C 30 นาที จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย GC-MS โดยใช้ capillary คอลัมน์ชนิด DB-WAX UI (30m x length 320µm x 0.5 µm) ฉีดตัวอย่างแบบ spitless อุณหภูมิ injector เท่ากับ 240 °C เป็นเวลา 20 นาที สภาวะของคอลัมน์ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 °C เป็นเวลา 2 นาที และเพิ่มขึ้นในอัตรา 5 °C ต่อ นาที จนถึง 90 °C และคงไว้ 5 นาที จากนั้นปรับให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 2 °C ต่อ นาที จนถึง 220 °C และคงไว้ 15 นาที ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา flow rate 1.6 มิลลิลิตร ต่อ นาที แปลผลโดยเทียบกับ library ของ NiST และ Wiley ที่ quality match >80%

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้าทำแห้งบดผง แสดงดัง Table 1 พบว่า ความชื้นเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้าหลังจากทำแห้งบดผง มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 4.37 และ 7.16 ตามลำดับ และเปลือกกาแฟปริมาณโปรตีนของเปลือก

ผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้าร้อยละ 10.77 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าที่มีโปรตีน ร้อยละ 8.32 เช่นเดียวกับกับผลการวิเคราะห์ปริมาณไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้าของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า ร้อยละ 1.56, 39.24 และ 7.18 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า สอดคล้องกับงานวิจัยเปลือกกาแฟในจังหวัดเชียงราย ของ Duangjai *et al.* (2016) พบปริมาณไขมัน และเถ้า เฉลี่ยประมาณร้อยละ 1.8 และ 8.6 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม จากรายงานพบว่าปริมาณโปรตีนในเปลือก

ผลกาแฟจากจังหวัดเชียงราย มีน้อยกว่าที่พบในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้งพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้า จากอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ส่วนของคาร์โบไฮเดรตในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าของจังหวัดกาญจนบุรีมีปริมาณร้อยละ 65.46 ซึ่งปริมาณสูงกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า (ร้อยละ 39.60) และความชื้นของเปลือกผลเชอร์รี่พันธุ์โรบัสต้ามีสูงกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่มีทิศทางเดียวกับปริมาณคาร์โบไฮเดรต

Table 1 Chemical composition of Robusta Coffee pulp and Arabica Coffee pulp

Chemical composition (%)	Robusta cherry coffee pulp	Arabica cherry coffee pulp
Protein	8.32 ± 0.62	10.77 ± 0.06
Lipid	0.83 ± 0.10	1.56 ± 0.39
Fiber	20.52 ± 0.21	39.24 ± 0.38
Ash	5.16 ± 0.11	7.18 ± 0.33
Carbohydrate	65.46 ± 0.55	39.60 ± 0.30
Moisture	7.16 ± 0.11	4.37 ± 0.46

การวิเคราะห์ปริมาณ และคุณสมบัติการออกฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในเปลือกกาแฟผลสด

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (radical scavenging assay) พบว่า สารสกัดจากเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า มีค่าเท่ากับ 114.41 ± 5.32 mg Trolox eq/g sample ซึ่งมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้มากกว่าสารสกัดจากเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า ที่มีค่าเท่ากับ 79.32 ± 4.61 mg Trolox eq/g sample ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า ซึ่งพบว่า มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า (87.14 ± 0.08 mg GA E/g DW) สูงกว่าในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าถึง 21 เท่า จึงส่งผลให้สารสกัดจากเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่า เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิก เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิโธโรเจนแก่อนุมูลอิสระ (Kumazawa *et al.*, 2004) เกิดเป็นสารที่เสถียรจึงสามารถยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระได้ ในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้งสายพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้า มีปริมาณใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 5.78-5.28 mg Cyanidin-3-Glucoside/100 g DW sample แอนโทไซยานิน เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) เป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งของสารประกอบฟีนอลิกที่

ให้สีม่วงแดงในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟ ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีปริมาณที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ABTS (cation radical scavenging assay) และFRAP (Ferric reducing antioxidant power) ในเปลือกผลเชอร์รี่พันธุ์โรบัสต้ามีค่าการออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชันมากกว่าเปลือกผล เชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า ซึ่งแสดงผลไปในทิศทางตรงกันข้ามกับผลการออกฤทธิ์ที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH assay ดังแสดงใน Table 2 อาจเกิดจากในส่วนของเปลือกนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบอื่นๆ ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด สอดคล้องกับรายงานของ Rohaya *et al.* (2023) และ Dos Santos *et al.* (2024) พบว่า เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าที่ปลูกในประเทศบราซิล มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และค่าการออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่ตรวจด้วยวิธี FRAP assay มากกว่าในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า แต่ไม่แสดงผลการออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่แตกต่างชัดเจนจากการตรวจสอบด้วยวิธี DPPH Assay และมีผลงานวิจัยของปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และปราณีต โอปะโสภิต (2556) ซึ่งรายงานความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของมะขามป้อม และเปลือกมังคุดที่พบว่า ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระกับสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดไม่ได้มีความสัมพันธ์ที่มีรูปแบบชัดเจน

การทดสอบความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการดักจับอนุมูลอิสระ ในปฏิกิริยาการต้านอนุมูลอิสระ DPPH• สารต้านอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ DPPH จะได้เป็นสาร DPPH ที่เสถียร ปฏิกิริยาจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง (เกสรีและคณะ, 2559) DPPH เป็นการศึกษากฎวิธีในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากความสามารถในการเป็นตัวให้อิเล็กตรอนอะตอม หรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ โดย DPPH เป็นอนุมูลอิสระสังเคราะห์ที่มีความคงตัวเมื่ออยู่ในรูป สารละลาย DPPH จะมีสีม่วง การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วย ABTS เป็นการศึกษากฎวิธีต้านอนุมูลอิสระ มีหลักการคล้ายกับวิธี DPPH คือ สร้างอนุมูลอิสระที่มีสีขึ้น โดยสร้างอนุมูลอิสระจากการทำปฏิกิริยาของสารละลาย ABTS กับ oxidizing agent คือ สารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) เมื่อ ABTS ถูกออกซิไดซ์ด้วย oxidizing agent จะเกิด ABTS free radical (ABTS•+)

สารต้านอนุมูลอิสระที่ต้องการนำมาทดสอบจะขจัด ABTS•+ ที่เมื่อทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระจะได้สาร ABTS ที่เสถียร จาก ABTS•+ สีเขียวเข้มเป็นสารละลายสีเขียวจางลง ยิ่งจางลงมากจะแสดงถึง ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี ในขณะที่ FRAP เป็นการทดสอบที่เลือกใช้ในการศึกษากฎวิธีในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (เหล็ก) ซึ่งเป็นอีกกลไกหนึ่งในการต้านอนุมูลอิสระ โดยสารที่มีค่า FRAP สูง แสดงว่ามีความสามารถในการรีดิวซ์เหล็กได้ดีมากเช่นเดียวกับ แสดงว่ามีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีด้วย มีผลการวิจัยของ Maxiselly *et al.* (2023) ที่ยืนยันว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้ามีปริมาณน้อยกว่าในพันธุ์อาราบิก้า แต่แสดงค่าการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ไม่แตกต่างกันระหว่าง 2 สายพันธุ์ จากการวัดด้วยวิธี FRAP assay

Table 2 Total Phenolic content, Anthocyanin content and antioxidant activity analyzed by ABTS, DPPH and FRAP assay from Arabica and Robusta cherry coffee pulp

	Robusta cherry coffee pulp	Arabica cherry coffee pulp
Chlorogenic acid (mg/L)	1,862.87 ± 300.64	2,331.77 ± 219.59
Caffeine (mg/L)	21,077.25 ± 3602.95	22,597 ± 510.47
Total Phenolic content (mg GA E/g DW)	4.39 ± 1.25	87.14 ± 0.08
Anthocyanin content (mg Cyanidin-3-Glucoside/100 g DW sample)	5.78 ± 0.26	5.28 ± 0.26
DPPH scavenging (mg Trolox eq/g sample)	79.32 ± 4.61	114.41 ± 5.32
ABTS scavenging (mg Trolox eq/g sample)	41.84 ± 2.04	28.04 ± 2.47
FRAP Ferric reducing antioxidant power (mg Trolox eq/g sample)	49.19 ± 0.54	27.28 ± 0.31

จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดคลอโรจินิกจากเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้า ด้วยเครื่อง HPLC ดัง Figure A และ B แสดงรีเทนชันไทม์ (retention time) ที่ขึ้นตรงกับ peak ของสารมาตรฐานที่ค่าเฟอีน และกรดคลอโรจินิกอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่า สารสกัดเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้ามีค่าเฟอีน และกรดคลอโรจินิก และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณค่าเฟอีนเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และพันธุ์โรบัสต้า พบว่า มีปริมาณค่าเฟอีนเท่ากับ 22,507.62 mg/L และ 21,077.25 mg/L ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Cañas *et al.* (2023) ที่พบว่าในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟมีค่าเฟอีน และสารประกอบฟีนอลิกจำนวนมาก ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกที่มีจำนวนมากที่สุด คือ กลุ่มกรด ฟีนอลิก และ ฟลาโวนอยด์ สอดคล้องกับปริมาณกรดคลอโรจินิกซึ่ง

เป็นกรดฟีนอลิกที่มีอยู่ในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า โดยประมาณ 2,331.77 mg/L และในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าประมาณ 1,862.872 mg/L สอดคล้องกับรายงานของ Dos Santos *et al.* (2024) พบว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ามีสารคาเฟอีนมากกว่าพันธุ์โรบัสต้า แต่มีการรายงานผลตรงกันข้ามสำหรับกรดคลอโรจินิก (Chlorogenic acid) ที่พบว่าปริมาณกรดคลอโรจินิกในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้ามากกว่าพันธุ์อาราบิก้า และ Vignoli *et al.* (2014) รายงานว่าเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสต้ามีความสามารถในการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่า เมล็ดกาแฟพันธุ์อาราบิก้า และสารประกอบฟีนอลิกที่พบในเมล็ดกาแฟดิบเป็นกรดคลอโรจินิกร้อยละ 6-8

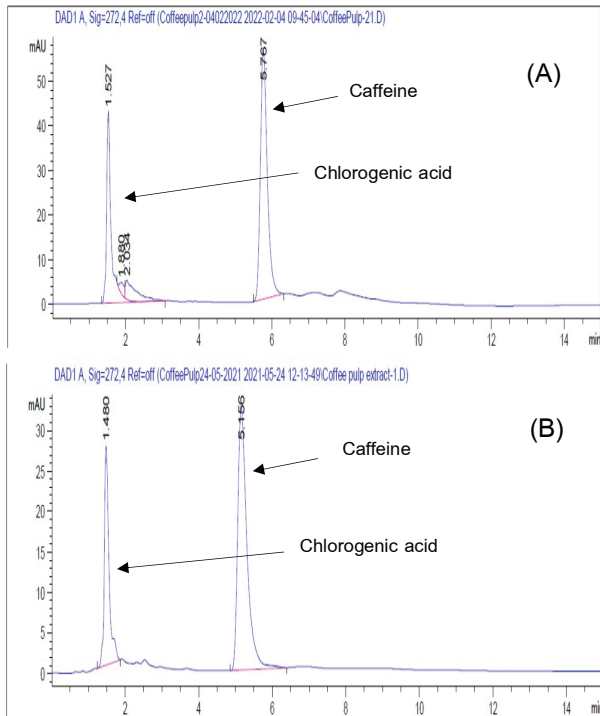


Figure 1 Chromatograms of chlorogenic acid and caffeine in Arabica cherry coffee pulp (A) and Robusta cherry coffee pulp (B)

คาเฟอีน (Caffeine) หรือเทอีน (theine) ชื่อทางเคมีคือ 1,3,7-trimethylxanthine เป็นสารประกอบอินทรีย์ ประเภท alkaloid จัดอยู่ในอนุพันธ์ xanthine ไม่มีกลิ่น มีรสขม มีอยู่ตามธรรมชาติในกาแฟ ใบชา โกโก้ คาเฟอีนมีผลทำให้ช่วยเพิ่มการตื่นตัว และการทำงานของสมอง พบว่าหากมีระดับคาเฟอีนในร่างกายที่ไม่สูงเกินไป ส่วนกรดคลอโรจีนิกเป็นเอสเทอร์ของกรดควินิกกับกรดคาเฟอิกหรือ กรดเฟอรูริก กรดคลอโรจีนิก เป็นสารที่ให้รสขมในกาแฟและจัดเป็นกลุ่มของสารประกอบที่แบ่งเป็นสารสำคัญ 2 กลุ่มใหญ่ คือ เอสเทอร์ของกรดควินิกกับกรดคาเฟอิก ซึ่งเรียกว่า กรดคาเฟอิลควินิก เช่น กรด 3-คาเฟอิลควินิกกับกรดเฟอรูิลควินิก

(3-feruloylquinic acid) โดยทั่วไปในเมล็ดกาแฟจะมีปริมาณกรดคลอโรจีนิก ชนิดกรด 3-คลอโรจีนิกมากที่สุด รองลงมาจะเป็นกรด 5-คาเฟอิลควินิก และกรด 4-คาเฟอิลควินิก ตามลำดับ ปริมาณกรดคลอโรจีนิกในเมล็ดกาแฟแต่ละชนิดมีไม่เท่ากันเช่นเดียวกับคาเฟอีน นั่นคือเมล็ดกาแฟที่มีปริมาณคาเฟอีนมากจะมีกรดคลอโรจีนิกมากด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้ง 2 พันธุ์ อย่างไรก็ตาม อภิรักษ์ธำรง (2548) รายงานว่า เมล็ดกาแฟชนิดโรบัสต้าจะมีคาเฟอีนและกรดคลอโรจีนิกสูงกว่าเมล็ดกาแฟชนิดอาราบิก้า แต่เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาเฟอีนกับกรดคลอโรจีนิก ประมาณ 5 เท่า ในกาแฟแต่ละถ้วยจะมีปริมาณกรดคลอโรจีนิก ประมาณ 100-200 มิลลิกรัม ปริมาณกรดคลอโรจีนิกประมาณ 1 ใน 3 จากที่ร่างกายได้รับจะถูกดูดซึมผ่านลำไส้เล็กเข้าสู่ร่างกาย ส่วนอีก 2 ใน 3 กรดคลอโรจีนิกจะผ่านไปยังลำไส้ใหญ่ แล้วถูกเมแทบอลิต์ โดยแบคทีเรียได้เป็นกรดคาเฟอิก (caffeic acid) หรือ กรด 3,4-ไดไฮดรอกซีซินนามิก (3,4-dihydroxycinnamic acid) และกรดควินิก (quinic acid) หลังจากนั้นทั้งสองสารจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดเบนโซอิกในร่างกาย เช่นเดียวกับกรดคลอโรจีนิกที่ถูกดูดซึมผ่านลำไส้เล็ก ซึ่งกรดเบนโซอิกจะเกิดคอนจูเกตกับไกลซีนเป็นกรดฮิบบูอิกแล้วถูกขับออกในปัสสาวะ

การวิเคราะห์สารหอมระเหย (volatile compounds) ด้วยเครื่อง GC-MS

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-MS พบสารทั้งหมด 32 ชนิด (ตารางที่ 3) เป็นสารที่มีปริมาณมาก 5 ชนิด ได้แก่ Phenol 54.78%, Caffeine 12.9%, Methyl ester hexadecanoic acid 4.73% และ 5-hydroxymethyl furfural 3.42% เป็นสารที่พบในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟปริมาณมากนั้นสามารถพบได้ตามธรรมชาติในผลกาแฟและผลไม้แห้ง โดยกาแฟคว่ำหลาย ชนิดมี HMF อยู่ระหว่าง 300 – 2,900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Murkovic & Pichler, 2006)

Table 3 Total volatile compounds from Arabica and Robusta cherry coffee pulp by GC-MS

RT (min)	Volatile compounds	% Relative Peak				The odor descriptions
		CPR	CPA	CPR + H2O	CPA + H2O	
22.19	5-methyl-2-furancarboxaldehyde	0.45	0.19	0.37	-	almond and caramel flavor
84	dihydro-furanone	0.31	-	-	-	
27.72	dimethyl-silanediol	3.33	1.46	6.71	6.89	
29.28	borneol	0.58	-	1.76	-	Patchouli, Borneo camphor
30.54	phenylmethyl ester acetic acid	0.28	-	-	-	sweet

Table 3 Total volatile compounds from Arabica and Robusta cherry coffee pulp by GC-MS (continue)

RT (min)	Volatile compounds	% Relative Peak				The odor descriptions
		CPR	CPA	CPR + H ₂ O	CPA + H ₂ O	
32.40	methyl salicylate		0.34	1.28	2.22	wintergreen leaves
37.16	hexanoic acid	1.66	10.31			fatty, cheesy, waxy
38.49	benzyl alcohol	1.38	1.23	1.24	1.17	floral and fruity
40.18	Phenylethyl alcohol	1.44	0.84	2.21	2.01	mild rose
43.04	1-1H-pyrrol-2-yl-ethanone	1.90	1.69	1.68		musty, nutty and tea-like
44.80	Phenol	54.78	38.89	42.54	27.99	
47.67	octanoic acid	1.20	0.89	1.82	1.14	cheesy, coconut oil, goat milk
52.15	4-cyclopropyl-2-methoxyphenol	0.31				
52.62	nonanoic acid	1.09	0.93	1.67	2.10	Waxy, oily and fatty
54.53	methyl ester hexadecanoic acid	4.73	5.18	8.15	15.23	Waxy, oily and fatty
55.73	Turmerone	0.87		2.42		turmeric
56.78	2,3- dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one	0.80	2.33			the intermediate stage of Maillard reaction
57.81	3,5-dihydroxy-2-methyl-4H-Pyran-4-one,	1.53	0.95			fruity
59.10	2,4-di-tert-butylphenol	1.59	1.64	2.67	4.55	phenolic
62.65	4-(1,1-dimethylpropyl)-phenol	1.49	0.44	2.33	0.89	
63.27	Benzoic acid	1.35	1.03	1.59		Substrate of Gallic acid
64.12	methyl ester octadecenoic acid	0.86	0.32	1.81		Oleic acid
65.41	2, 4-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol	0.39		0.46		antioxidant
66.10	methyl ester octadecadienoic acid		1.53			conjugated linoleic acid (CLA)
66.13	dodecanoic acid			3.20		lauric acid
66.48	5-hydroxymethyl furfural	3.42				honey and caramel aroma
68.44	3-hydroxy-4-methoxybenzaldehyde	1.37	0.96	1.76	1.45	Isovanillin
74.32	Tetradecanoic acid		1.10	3.24	1.93	myristic acid
77.02	Dodecanamide		1.98	1.32	2.55	a fatty amide of lauric acid
82.07	Hexadecanoic acid		8.30	6.26	13.39	palmitic acid
92.51	caffeine	12.90	17.49	3.52	16.51	

RT = Retention time, CPR = เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟโรบัสต้า, CPA = เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟอาราบิก้า, CPR+H₂O = สารละลายเปลือกเชอร์รี่กาแฟโรบัสต้า, CPA+H₂O = สารละลายเปลือกเชอร์รี่กาแฟอาราบิก้า, The odor descriptions were cited from <http://www.flavornet.organdarecentreport>

Husoya *et al.* (2008) รายงานว่าลูกพลัมแห้งมี HMF สูงถึง 2,200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในเบียร์ดำ 13.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มี HMF อยู่ระหว่าง 4.1 - 151 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Ramírez-Jimenez *et al.*, 2000) ยิ่งไปกว่านั้น Berneol 0.58% เป็นสารหอมระเหยของพืชมะพร้าว และ Turmerone 0.87% เป็นสารหอมระเหยของขมิ้น ที่พบในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าเท่านั้น และ 4-cyclopropyl-

2-methoxyphenol ที่พบในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า methyl salicylate ในน้ำมันระกำ กรดเฮกซะโนอิก (hexanoic acid) เป็นกรดไขมันชนิดสายสั้น (short chain fatty acid) ซึ่งระเหยได้และให้กลิ่นรส ในอาหาร กรดชนิดนี้พบเป็นส่วนประกอบมากในเนย (butter) ไขมันเนย (butter fat) และกรดออกตะโนอิก (octanoic acid) จัดเป็นกรดไขมันชนิดสายสั้น (short chain fatty acid) พบมากในไขมันนมและน้ำมันมะพร้าว เป็นสารให้

กลิ่นและรสชาติ อย่างไรก็ตามสารหอมระเหยที่อยู่ในกลุ่มน้ำมัน เช่น conjugated linoleic acid myristic acid lauric acid และ palmistic acid รวมถึง caffeine พบในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ามากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า จากผลการวิเคราะห์สารหอมระเหยในตัวอย่างแห้ง (CPR, CPA) และตัวอย่างสารละลาย (CPR + H₂O, CRA + H₂O) แสดงให้เห็นว่า การแช่เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้าในน้ำ ทำให้เกิด สารหอมระเหยที่เปลี่ยนแปลงไป สารหอมระเหยที่หายไป ในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า (CPR + H₂O) ส่วนใหญ่ เป็นกลุ่มที่ละลายน้ำได้ คือ 5-phenylmethyl ester acetic acid (sweet) 3,5-dihydroxy-2-methyl-4H-Pyran-4-one (Fruity) 5-hydroxymethyl furfural (honey and caramel aroma) และ 2,3- dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one (the intermediate stage of Maillard reaction) ซึ่งอาจจะระเหยไประหว่างการเตรียม แต่ความน่าสนใจของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมตัวอย่างเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า และ อาราบิก้าโดยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C ให้สารหอมระเหย ที่พบมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกลิ่นที่มีลักษณะพิเศษ ได้แก่ borneol, methyl salicylate (wintergreen leaves), Phenylethyl alcohol (mild rose), octanoic acid (cheesy, coconut oil, goat milk), oonanoic acid, oleic acid, 2, 4-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol (antioxidant), lauric acid, Isovanillin, myristic acid, Dodecanamide (a fatty amide of lauric acid) และ palmitic acid การสกัดสารหอมระเหยกาแฟด้วยน้ำและความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารหอมระเหย ซึ่งไม่เสถียรและสลายตัวได้ง่าย ทำให้จำนวนของสารหอมระเหยจากเปลือกผลเชอร์รี่พันธุ์อาราบิก้าที่แช่น้ำมีจำนวนน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์การสกัดด้วยน้ำอุ่นทำให้สารหอมระเหยบางตัวในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้ง 2 สายพันธุ์ สามารถระเหยปลดปล่อยกลิ่นได้มากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Buck *et al.* (2021) พบการเปลี่ยนของกลิ่นเปลือกกาแฟที่ผ่านกระบวนการลวก เช่น geraniol (flowery) เพิ่มขึ้น แต่ส่วนใหญ่จะพบว่า มีกลิ่นลดลง และในงานวิจัยนี้พบกลิ่น octanoic acid (fatty, musty) เหมือนกับที่พบในเปลือกผลเชอร์รี่ของกาญจนบุรี อย่างไรก็ตามกลิ่นและรสชาติของกาแฟจะขึ้นอยู่กับแหล่งเพาะปลูก

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมากกว่าพันธุ์อาราบิก้า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้าของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ามากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า เปลือกผลเชอร์รี่กาแฟอาราบิก้ามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการออกฤทธิ์การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณและผลการออกฤทธิ์ในเปลือกผล

เชอร์รี่กาแฟโรบัสต้า ในขณะที่ค่าการออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ABTS assay และ FRAP assay ของเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์โรบัสต้า มีค่าการออกฤทธิ์มากกว่าเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้า และปริมาณแอนโทไซยานินในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟทั้ง 2 พันธุ์มีค่าไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณคาเฟอีน และกรดคลอโรจีนิกในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟพันธุ์อาราบิก้ายังสูงกว่าโรบัสต้าเล็กน้อย จากการวิเคราะห์สารหอมระเหยด้วยเครื่อง GC-MS พบว่ามีสารหอมระเหยทั้งหมด 32 ตัว สารหอมระเหยที่มีมากที่สุด คือ phenol และ caffeine แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีสารหอมระเหยที่น่าสนใจคือ borneol และ turmerone ซึ่งให้กลิ่นรสพิเศษในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟโรบัสต้าเท่านั้น

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเปลือกผลกาแฟเป็นส่วนที่มีสารสำคัญที่มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์สำคัญได้ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกกาแฟได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านสุขภาพและความงามต่อไปได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารออกฤทธิ์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของเปลือกผลกาแฟพันธุ์อาราบิก้า และโรบัสต้าที่ได้จากอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มีความแตกต่างกัน ในส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay ABTS assay และ FRAP assay เนื่องจากสารต้านอนุมูลอิสระในเปลือกผลเชอร์รี่กาแฟมีหลายชนิดมีปริมาณไม่เท่ากัน และแต่ละชนิดมีความสามารถในการออกฤทธิ์ต่างกัน และอาจจะต้องมีการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกแต่ละชนิดเพิ่มเติม เพื่อเป็นฐานข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับสารต้านอนุมูลอิสระต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานนี้เป็นส่วนต่อยอดของโครงการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมชุมชนเพื่อยกระดับศักยภาพและความเข้มแข็งของชุมชนในจังหวัดกาญจนบุรี ภายใต้งบประมาณสนับสนุนทุนวิจัยโดยกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.)

เอกสารอ้างอิง

เกสรี กลิ่นสุคนธ์, อุดมลักษณ์ สุขอัติตะ, ประภัสสร รักถาวร, & ลลิตา คชรัตน์. (2559). การศึกษาคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายบางชนิด. *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54* (น. 849–856). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ปราโมทย์ คูวิจิตรจรรู, & ปราณีต โอปะโสภิต. (2556). การพัฒนาวิธีการตรวจสอบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในมังคุดและมะขามป้อมด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ [รายงานวิจัย]. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อวยพร อภิรักษ์ธำรงวง. (2548). การบริโภคกาแฟกับความเสี่ยงต่อเบาหวานชนิดที่ 2. *วารสารไทยโภชนาการ*, 2(4), 11–21.
- AOAC International. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
- Boskou, D. (2006). Sources of natural phenolic antioxidants. *Trends in Food Science & Technology*, 17(9), 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.008>
- Buck, N., Wohlt, D., Winter, A. R., & Ortner, E. (2021). Aroma-active compounds in Robusta coffee pulp puree—Evaluation of physicochemical and sensory properties. *Molecules*, 26(13), Article 3925. <https://doi.org/10.3390/molecules26133925>
- Cañas, S., Rebollo-Hernanz, M., Martín-Trueba, M., Braojos, C., Gil-Ramírez, A., Benítez, V., Martín-Cabrejas, M. A., & Aguilar, Y. (2023). Exploring the potential of phenolic compounds from the coffee pulp in preventing cellular oxidative stress after in vitro digestion. *Food Research International*, 172, Article 113116. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113116>
- Dos Santos, É. M., de Macedo, L. M., Ataide, J. A., Delafiori, J., de Oliveira Guarnieri, J. P., Rosa, P. C. P., Ruiz, A. L. T. G., Lancellotti, M., Jozala, A. F., Catharino, R. R., Camargo, G. A., Paiva-Santos, A. C., & Mazzola, G. P. (2024). Antioxidant, antimicrobial and healing properties of an extract from coffee pulp for the development of a phytocosmetic. *Scientific Reports*, 14, Article 4453. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55029-3>
- Duangjai, A., Suphrom, N., Wungrath, J., Ontawong, A., Nuengchamnon, N., & Yosboonruang, A. (2016). Comparison of antioxidant, antimicrobial activities and chemical profiles of three coffee (*Coffea arabica* L.) pulp aqueous extracts. *Integrative Medicine Research*, 5(4), 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.imr.2016.09.002>
- Husøya, T., Haugen, M., Murkovic, M., Jöbstl, D., Stølen, L. H., Bjellaas, T., Rønningborg, C., Glatt, H., & Alexander, J. (2008). Dietary exposure to 5-hydroxymethylfurfural from Norwegian food and correlations with urine metabolites of short-term exposure. *Food and Chemical Toxicology*, 46(12), 3697–3702. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.048>
- Kumazawa, S., Hamasaka, T., & Nakayama, T. (2004). Antioxidant activity of propolis of various geographic origins. *Food Chemistry*, 84(3), 329–339. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00256-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00256-4)
- Maxiselly, Y., Maulana, H., Chumthong, A., & Chiarawipa, R. (2023). Relationship analysis based on phytochemical contents among coffee pulp from three coffee species collected in Southern Thailand and Jambi, Indonesia. *Biodiversitas*, 24(10), 5439–5445. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d241001>
- Murkovic, M., & Pichler, N. (2006). Analysis of 5-hydroxymethylfurfural in coffee, dried fruits and urine. *Molecular Nutrition & Food Research*, 50(9), 842–846. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600051>
- Ramírez-Jiménez, A., García-Villanova, B., & Guerra-Hernández, E. (2000). Hydroxymethylfurfural and methylfurfural content of selected bakery products. *Food Research International*, 33(10), 833–838. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00112-8](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00112-8)
- Ramirez-Martinez, J. R. (1988). Phenolic compounds in coffee pulp: Quantitative determination by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 43(2), 135–144. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740430205>
- Rohaya, S., Anwar, S. H., Amhar, A. B., Sutriana, A., & Muzaifa, M. (2023). Antioxidant activity and physicochemical composition of coffee pulp obtained from three coffee varieties in Aceh, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1182, Article 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1182/1/012063>
- Rojas, J. B. U., Verreth, J. A. J., Van Weerd, J. H., & Huisman, E. A. (2002). Effect of different chemical treatments on nutritional and antinutritional properties of coffee pulp. *Animal Feed Science and Technology*, 99(3–4), 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00130-7)

Shahidi, F., & Naczk, M. (2003). *Food phenolics: Sources, chemistry, effects, applications*. CRC Press.

Singleton, V. L., & Rossi, J. A., Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagent. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>

Vignoli, J. A., Viegas, M. C., Bassoli, D. G., & Benassi, M. T. (2014). Roasting process affects differently the bioactive compounds and the antioxidant activity of arabica and robusta coffees. *Food Research International*, 61, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.06.004>

ความหลากหลายชนิดและมูลค่าทางเศรษฐกิจของพืชวงศ์แตงในพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา

Species diversity and economic value of cucurbitaceae in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province

จุฑาทพร มุสิมุล¹, สันติ วัฒนฐานะ¹ และ นูดูอัน เมืองแสน^{1*}
Chuthapond Musimun¹, Santi Watthana¹ and Nooduan Muangsan^{1*}

Received: 3 July 2024 ; Revised: 9 September 2024 ; Accepted: 2 October 2024

บทคัดย่อ

วงศ์แตง (Cucurbitaceae) เป็นพืชจำพวกผักและผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและคุณค่าทางเศรษฐกิจ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกษตรและความมั่นคงทางอาหารของโลก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายชนิดของพืชวงศ์แตงที่ชุมชนนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ รวมถึงมูลค่าทางเศรษฐกิจของพืชวงศ์แตงในพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา ด้วยวิธีการสำรวจชนิดพืชวงศ์แตงในพื้นที่ช่วงเดือนกรกฎาคม 2566 ถึง กรกฎาคม 2567 ใช้เกณฑ์การคัดเลือกผู้ให้สัมภาษณ์โดยวิธีการบอลลูกหิมะ (Snowball Sampling) ผู้วิจัยทำการสัมภาษณ์และการสังเกตเกษตรกรทั้งทางตรงและทางอ้อมจำนวน 36 คน ผลการศึกษาพบพืชวงศ์แตงทั้งสิ้น 10 สกุล 13 ชนิด มีเพียง 10 ชนิดที่เกษตรกรปลูกจำหน่าย ซึ่งมีค่าดัชนีความนิยมปลูก (Use Value: UV) ของแตงกวาสูงสุด คือ 1.10 รองลงมาคือ แตงโม บวบหอม และฟักทอง มีค่า UV คือ 0.25 เท่ากัน ขณะที่น้ำเต้าและบวบเหลี่ยมมีค่า UV ต่ำสุด คือ 0.05 เมื่อวิเคราะห์ความถี่ในการปลูกของพันธุ์พืชแต่ละชนิด พบว่า พันธุ์แตงกวาที่ปลูกจำหน่ายมากที่สุดได้แก่ พันธุ์โนเบล (22.73%) ซีนอน (13.68%) เขียวจิ้งและวินเนอร์ 2 (9.09%) แหล่งที่มาของเมล็ดพันธุ์ที่นำมาปลูกในพื้นที่เกษตรกรใช้เมล็ดทางการค้า (C = commercial seeds) มากที่สุดคือ 81.25% และใช้เมล็ดพันธุ์จากการเก็บเมล็ดเอง (S = self-collected seeds) 18.8% เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ปลูกจากเกษตรกร 36 คน พบว่า แตงโมมีพื้นที่ปลูกอยู่ระหว่าง 0.25 - 60.00 ไร่ รองลงมาเป็นมะระ มีพื้นที่ปลูกระหว่าง 2.00 - 8.00 ไร่ และแตงกวามีพื้นที่ปลูกระหว่าง 0.01-3.50 ไร่ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลผลิตและค่าเฉลี่ยรายได้ต่อปี พบว่า แตงโมให้ปริมาณผลผลิตสูงสุดที่ 24.00 ตัน/ไร่/ปี และค่าเฉลี่ยรายได้ต่อครัวเรือน คือ 86,832.00 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี รองลงมาเป็นมะระให้ปริมาณผลผลิต 2.50 - 18.00 ตัน/ไร่/ปี และค่าเฉลี่ยรายได้ต่อครัวเรือน คือ 167,625.00 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี แตงกวาให้ปริมาณผลผลิต 0.10 - 76.80 ตัน/ไร่/ปี และค่าเฉลี่ยรายได้ต่อครัวเรือนคือ 11,245.72 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี โดยแตงโมมีค่าเฉลี่ยมูลค่าทางการตลาดสูงสุดคือ 434,160.00 บาท/ไร่/ปี

คำสำคัญ: พืชวงศ์แตง พืชอาหาร พฤกษศาสตร์พื้นบ้าน มูลค่าทางเศรษฐกิจ อำเภอชุมพวง

Abstract

The Cucurbitaceae family includes nutritionally and economically valuable fruits and vegetables, which are important to agriculture and world food security. The purpose of this study was to investigate the economic value of the Cucurbitaceae family plants in the Chum Phuang District of Nakhon Ratchasima Province, as well as the different varieties that the community employs in a variety of applications. A survey of Cucurbitaceae in the area was conducted from July 2023 to July 2024, using the criteria for selecting interviewees by Snowball Sampling. The researchers interviewed and observed 36 farmers, both directly and indirectly. The result showed that there was a total of 10 genera and 13 species of Cucurbitaceae, with only 10 species being grown and sold by farmers. The highest planting popularity index (use value: UV) for *Cucumis sativus* L. was 1.10, followed by *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai, *Luffa aegyptiaca* Mill., and *Cucurbita moschata* Duchesn ex Poir. with a UV value of 0.25, while *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl. and *Luffa acutangula* (L.) Roxb had the lowest UV value of 0.05. It found that the most popular cultivars

¹ สาขาวิชาชีววิทยา, สำนักวิชาวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ School of Biology, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

* ผู้ประสานงาน Nooduan Muangsan Email nooduan@g.sut.ac.th

of *Cucumis sativus* L. grown for sale were Nobel (22.73%), Xenon (13.68%), Khiew Jang and Winner 2 (9.09%). The most common seed sources used were commercial seeds (81.25%) and self-collected seeds (18.75%). *Citrullus lanatus* had the largest planting area between 0.25 to 60.00 rai, followed by *Momordica charantia* and *Cucumis sativus*, with planting areas between 2.00 to 8.00 rai, and 0.01 to 3.50 rai, respectively. This trend is aligning with their yields and annual incomes. *Citrullus lanatus* had the highest yield at 24.00 tons/rai/year and the average income per household 86,832.00 baht/household/rai/year. *Momordica charantia* came in second with the yield of 2.50-18.00 tons/rai/year and the average income per household 167,625.00 baht/household/rai/year. *Cucumis sativus* gave a production volume of 0.1-76.8 tons/rai/year and the average income per household was 11,245.72 baht/household/rai/year. Moreover, *Citrullus lanatus* had the highest average market value at 434,160.00 baht/rai/year.

Keywords: Cucurbitaceae, Food plant, Ethnobotany, Economic value, Chum Phuang District

บทนำ

พืชวงศ์แตง (Cucurbitaceae) เป็นพืชมีลักษณะลำต้นเป็นเถาไม้เลื้อยเนื้ออ่อน ฤดูเดียว จนถึงเถาไม้เนื้อแข็ง มีมือเกาะแยกออกจากข้อ ใบเดี่ยว ดอกแยกเพศร่วมต้น (monoecious plant) หรือแยกเพศต่างต้น (dioecious plant) ช่อดอกอยู่ตามซอกใบ มีการกระจายพันธุ์อยู่ทั่วโลก และพบการกระจายพันธุ์ในเขตร้อนมากที่สุด (Simpson, 2010) การใช้ประโยชน์ของพืชวงศ์แตงมีความสำคัญตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบการเพาะปลูกเริ่มต้นทางตอนเหนือของประเทศไทย จากหลักฐานวรรณกรรม การเกษตรและการแพทย์โบราณ บันทึกวิธีการใช้ประโยชน์จากพืชวงศ์แตงหลายชนิด เกษตรกรมีการใช้ประโยชน์พืชวงศ์แตงทั้งการบริโภคเป็นอาหารและใช้เป็นยา (Wang, 2023) พืชวงศ์แตงจัดเป็นพืชกลุ่มอาหารที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจระดับประเทศและระดับท้องถิ่น มีความหลากหลายทางพันธุกรรมสูง ครอบคลุม 115 สกุล และมากกว่า 960 ชนิด เรียกรวมกันว่า น้ำเต้าหรือแตง (Yiblet, 2023) ในประเทศไทยพบพืชวงศ์แตง 27 สกุล ครอบคลุม 70 ชนิด โดยทั่วไปพบมีการเพาะปลูกไม่น้อยกว่า 10 สกุล (De Wilde & Duyfjes, 2008) ช่วงที่ผ่านมา การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้าน เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น ความแห้งแล้ง แมลงศัตรูพืช และโรค ส่งผลกระทบต่อกลุ่มเกษตรกรการผลิตพืชผลทั่วโลก (Kong et al., 2023) เกษตรกรได้เรียนรู้และเลือกชนิดพืชปลูกที่เหมาะสมในพื้นที่ของตนจากประสบการณ์ของตนเอง เพื่อสร้างผลผลิตทางการเกษตรที่นำไปสู่การสร้างรายได้ให้กับครอบครัว

อำเภอชุมพวง เดิมเป็นหนึ่งในอำเภอพิมาย มีแม่น้ำมูลและแม่น้ำลำปลายมาศไหลผ่าน นับว่าเป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์พื้นที่หนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา แต่อย่างไรก็ตามยังมีหลายพื้นที่ในอำเภอชุมพวงที่ประสบปัญหาภัยแล้งซึ่งเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำอาชีพของเกษตรกรในการผลิตพืชผลทางการเกษตรจึงทำให้ประชาชนขาดรายได้ หลายหน่วยงานเข้ามาร่วมแนะนำและแก้ไข

ปัญหาดังกล่าวในภาคการเกษตร เช่น เกษตรทฤษฎีใหม่ โดงหนองนา การจัดการดิน การจัดการน้ำ และการจัดการพืช เป็นต้น พร้อมกับอาศัยความร่วมมือของหน่วยงานรัฐกับบางชุมชนในพื้นที่ ทำให้มีรายได้ที่เพิ่มขึ้น การใช้ประโยชน์ของพืชวงศ์แตงในพื้นที่ที่มีการกระจายตามชุมชน มีทั้งปลูกเพื่อบริโภคในครัวเรือน และปลูกเพื่อจำหน่าย เนื่องจากมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น พืชวงศ์แตงบางชนิดชาวบ้านเก็บเมล็ดพันธุ์จากรุ่นสู่รุ่น จึงทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ รวมถึงมีพืชวงศ์แตงบางชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่ไม่มีการใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน แต่มีการใช้ประโยชน์ในอดีต

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายชนิดพืชวงศ์แตงที่ชุมชนนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ และมูลค่าทางเศรษฐกิจพืชวงศ์แตงในพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา รวมถึงแหล่งของเมล็ดพันธุ์ที่เกษตรกรนำมาเพาะปลูก เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับเป็นแนวทางในการจัดการส่งเสริมการปลูกพืชอาหารเพื่อสร้างรายได้ในชุมชนต่อไป

การทดลอง

1. กลุ่มตัวอย่าง

สำรวจและรวบรวมชนิดพืชวงศ์แตงในพื้นที่ 9 ตำบล ในอำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา ช่วงเดือนกรกฎาคม 2566 ถึง กรกฎาคม 2567 ใช้วิธีการสัมภาษณ์และการสังเกตเกษตรกรทั้งทางตรงและทางอ้อม (มุสตี พรหมประสิทธิ์ และคณะ, 2562) จำนวน 36 คน ใช้เกณฑ์การคัดเลือกผู้ให้สัมภาษณ์โดยวิธีการบอลลูน (Snowball Sampling)

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยทำการสัมภาษณ์ และจัดทำเอกสารสำหรับการปฏิบัติงานในการลงพื้นที่ แนวคำถามประกอบด้วย แบบสำรวจข้อมูล บันทึกทั่วไปของผู้ให้สัมภาษณ์ ชนิดพืช การใช้ประโยชน์ แหล่งที่มาเมล็ดพันธุ์ และข้อมูลมูลค่าทางเศรษฐกิจ การระบุและตรวจสอบชนิด (species) อ้างอิงตาม Flora of

Thailand (De Wilde & Duyfjes, 2008) และ Forest and Plant Conservation Research Office (2024) สำหรับชื่อพันธุ์อ้างอิงตามชื่อการค้า และชื่อพันธุ์ตามที่เกษตรกรเรียก ส่วนพันธุ์ที่เกษตรกรคัดเลือกไว้และไม่ได้ตั้งชื่อไว้ ในการศึกษาจะเรียกว่า พันธุ์พื้นเมือง (Local cultivar)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ใช้วิธีพรรณนาค่าสถิติพื้นฐาน เช่น ความถี่ ร้อยละ และข้อมูลการใช้ประโยชน์ Use Value (UV) = $\sum U_i/N$ กำหนดให้ U_i คือ จำนวนรายงานการปลูกของพืชแต่ละชนิด อ้างอิงจากการเก็บข้อมูลแต่ละบุคคล (N คือ จำนวนผู้ให้ข้อมูลทั้งหมด หากค่า UV มีค่าสูง แสดงว่าพืชชนิดนั้นเกษตรกรให้ความนิยมปลูกมาก หรือมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงความนิยมปลูกน้อย (ชูศรี ไตรสนธิ และคณะ, 2561) และมูลค่าทางการตลาด (Market value) = ปริมาณผลผลิตต่อปี (kg) x ราคาขายของพืชชนิดนั้น ๆ (บาท/kg) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ราคาในท้องตลาด โดยใช้ราคากลางรายพืชมาคำนวณ (วรารภรณ์ นันทะเสน และ เก นันทะเสน, 2561; กรมการค้าภายใน, 2567)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การสำรวจความหลากหลายชนิดของพืชวงศ์แตง

จากการสัมภาษณ์เกษตรกร 36 คนใน 9 ตำบล ในพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา พบว่า มีเกษตรกรปลูกพืชวงศ์แตง 7 ตำบล มีเกษตรกรอายุต่ำสุด 28 ปีและสูงสุด 86 ปี รวบรวมรายการจัดบันทึกได้ทั้งหมด 85 รายการ พบพืชในวงศ์แตงทั้งสิ้น 10 สกุล 13 ชนิด 49 สายพันธุ์ คิดเป็นร้อยละ 16.66 ของชนิดพืชวงศ์แตงในประเทศไทยจากทั้งหมด 78 ชนิด (POWO, 2024) และคิดเป็นร้อยละ 46.43 ของชนิดที่มีรายงานการใช้ประโยชน์จากการรายงานการศึกษาพฤกษศาสตร์พื้นบ้านภาคเหนือ (28 ชนิด) โดยวิทยา ปองอมรกุล และคณะ (2560)

พืชวงศ์แตงทั้ง 13 ชนิดที่ได้จากการสำรวจนี้ เป็นพืชที่บริโภคได้ทั้งหมด เกษตรกรมีการใช้ประโยชน์โดยตรงจากพืชวงศ์แตงแบ่งเป็น ปลูกขายอย่างเดียว บริโภคเองอย่างเดียว และทั้งปลูกขายและบริโภคเอง คิดเป็นร้อยละ 43.00, 31.00 และ 26.00 ของการใช้ประโยชน์โดยตรงจากพืชวงศ์แตงทั้งหมด (Figure 1) ชนิดที่พบการปลูกมากที่สุด คือ แตงกวา (ร้อยละ 36.47) พักทอง (ร้อยละ 14.12%) และแตงโม (ร้อยละ 8.24%) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาชนิดที่เกษตรกรนิยมปลูกขาย พบว่ามีเกษตรกรปลูกพืชวงศ์แตงเพื่อจำหน่ายจำนวน 27 คน คิดเป็นร้อยละ 75.00 ของเกษตรกรทั้งหมดที่ได้สัมภาษณ์ ส่วนเกษตรกรอีก 16 คน ปลูกพืชวงศ์แตงเพื่อบริโภคในครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 44.45 มีการปลูกพืชวงศ์แตงเพื่อการจำหน่ายจำนวน

10 ชนิด ได้แก่ แตงโม แตงกวา แตงไทย น้ำเต้า บวบขม บวบหอม บวบเหลี่ยม พัก พักทอง และมะระ (Figure 2) จำนวนค่าดัชนีความนิยมปลูก (Use Value: UV) พบว่า เกษตรกรให้ความนิยมปลูกแตงกวามากที่สุด โดยมีค่า UV สูงสุด คือ 1.10 รองลงมา คือ แตงโม บวบหอม และพักทอง มีค่า UV คือ 0.25 เท่ากัน ขณะที่ น้ำเต้าและบวบเหลี่ยมเกษตรกรให้ความนิยมปลูก โดยมีค่า UV ต่ำสุด คือ 0.05 เมื่อวิเคราะห์ความถี่ในการปลูกพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด พบว่า แตงกวาพันธุ์ที่เกษตรกรนิยมปลูกเพื่อจำหน่ายมากที่สุด ได้แก่ พันธุ์โนเบล (ร้อยละ 22.73) ซีนอน (ร้อยละ 13.68) เขียวจิ้งและวินเนอร์ 2 (ร้อยละ 9.09) ตามลำดับ รองลงมาเป็น พักทอง นิยมปลูกพันธุ์ขาวดอก (ร้อยละ 40.00) ทองอำไพ 426 ศรีเมือง และศรีเมืองทองใหญ่ 050 (ร้อยละ 20.00%) และแตงโม นิยมปลูกสายพันธุ์ กิณีรี คริมสันเรดดำ ตอปีโด-เมย์บี๊กจิน 175 (ร้อยละ 20.00) เช่นเดียวกับบวบหอม นิยมปลูกพันธุ์พื้นเมือง (ร้อยละ 80.00) และลูกยาว (ร้อยละ 20.00) ตามลำดับ (Figure 3, Table 1) จากการสำรวจชนิดที่พบในพื้นที่และชนิดที่เกษตรกรนิยมปลูกจำหน่าย พบว่าแตงกวาเป็นที่นิยมมากที่สุด อาจเนื่องจากแตงกวาเป็นผักวงศ์แตงที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในโลก (Mathew, 2022) และยังเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในกลุ่มพืชผัก 10 อันดับแรกของโลก (Schaefer et al., 2009) จากการรายงานการปลูกแตงกวาในไทยเมื่อปี 2562 พบพื้นที่ปลูกแตงกวาในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา 523 ไร่ ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ 408.52 ตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2563) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรรายงานของปี 2561 พบพื้นที่ปลูก 481.00 ไร่ ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ 1,119.65 ตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562) และอีกเหตุผลหนึ่ง คือ มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวสั้นใช้เวลา 25-30 วัน ปลูกได้ทุกฤดูกาล โดยพื้นที่ 1 ไร่ สามารถปลูกได้ 3 รุ่น จากข้อมูลต้นทุนการผลิตและผลตอบแทน พบว่า เกษตรกรได้รับผลตอบแทน 60,000.00 บาทต่อไร่ต่อปี ถือได้ว่ามีรายได้สูงในการปลูกพืชชนิดนี้ (ศูนย์วิทยบริการเพื่อส่งเสริมการเกษตร, 2561)

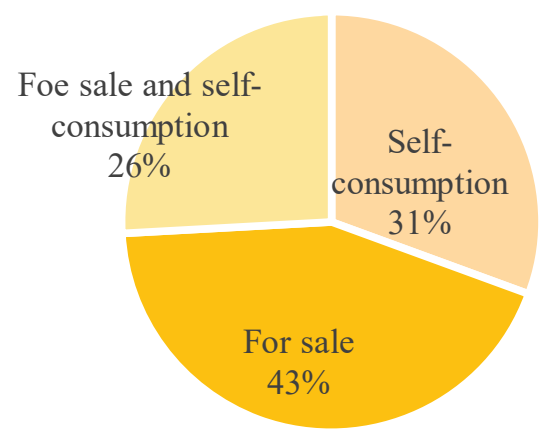


Figure 1 Proportion of direct use of Cucurbitaceae plants

เมื่อสอบถามแหล่งที่มาของเมล็ดพันธุ์จากเกษตรกรผู้ปลูกขาย พบว่า เกษตรกรใช้เมล็ดทางการค้า (C = commercial seeds) มากที่สุดคือ ร้อยละ 81.25 และใช้พันธุ์จากการเก็บเมล็ดเอง (S = self-collected seeds) ร้อยละ 18.75 ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้เมล็ดทางการค้า เนื่องจากให้ผลผลิตสูง และจากการเกษตรในประเทศไทยได้ปรับเปลี่ยนไปเป็นภาคอุตสาหกรรม โดยเน้นกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตในปริมาณมาก (ศราภา ศุภรินทร์, 2564) แต่มีเกษตรกรเพียงบางกลุ่มเท่านั้นที่เก็บเมล็ดพันธุ์เอง โดยเฉพาะพันธุ์พื้นเมืองนิยมเก็บเมล็ดจากรุ่นสู่รุ่น ได้แก่ แดงกวาสายพันธุ์แดงช้าง และแดงไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นพันธุ์พืชที่มีการคัดเลือกปลูกมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ทำให้ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี (Kumar et al., 2021)

จากการศึกษาการปลูกพืชวงศ์แตงในช่วงเดือนกรกฎาคม 2566 ถึง กรกฎาคม 2567 โดยวิเคราะห์พื้นที่ปลูก ปริมาณผลผลิตรวม (annual yield) (ตัน/ไร่/ปี) และรายได้ (บาท/ไร่/ปี) พบว่า แดงโมมีพื้นที่ปลูกมากที่สุดโดยมีพื้นที่ปลูก อยู่ระหว่าง 0.25 - 60.00 ไร่ ปลูก 1-4 ครั้ง/ปี มีปริมาณผลผลิตรวม 0.13 - 24.00 ตัน/ไร่/ปี รายได้ 11,000.00 - 288,000.00 บาท/ไร่/ปี และรายได้เฉลี่ยต่อครัวเรือน เท่ากับ 86,832.00 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี รองลงมาคือมะระ มีพื้นที่ปลูกระหว่าง 2.00 - 8.00 ไร่ ปลูก 3 ครั้ง/ปี ให้ปริมาณผลผลิตรวม 2.50 - 18.00 ตัน/ไร่/ปี รายได้ 80,000.00 - 540,000.00 บาท/ไร่/ปี และรายได้เฉลี่ยต่อครัวเรือน เท่ากับ 167,625.00 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี แดงกวาง มีพื้นที่ปลูกระหว่าง 0.01 - 3.50 ไร่ ปลูก 1-9 ครั้ง/ปี ไร่ ปริมาณผลผลิต 0.10 - 76.80 ตัน/ไร่/ปี โดยเฉพาะพันธุ์โนเบล ให้ปริมาณผลผลิตสูงสุด 76.8 ตัน/ไร่/ปี เนื่องจากมีเกษตรกรผู้ปลูกทั้งสิ้นจำนวน 5 รายและปลูก 6 ครั้ง/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับแดงกวางสายพันธุ์อื่นซึ่งมีเกษตรกรผู้ปลูกจำนวน 1 - 3 ราย การปลูกแดงกวางมีรายได้ 2,000.00 - 1,536,000.00 บาท/ไร่/ปี และค่าเฉลี่ยรายได้ต่อครัวเรือน คือ 11,245.72 บาท/ครัวเรือน/ไร่/ปี เช่นเดียวกับ Schaffer and Paris (2003) ที่รายงานว่ามีพืชวงศ์แตง 3 ชนิด

ได้แก่ แดงกวาง ฟักทอง และแดงโม เป็นกลุ่มพืชผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ 10 อันดับแรกของโลก ในการศึกษาเมื่อวิเคราะห์มูลค่าทางการตลาด พบว่า แดงโมมีค่าเฉลี่ยมูลค่าทางการตลาดสูงสุดคือ 434,160.00 บาท/ไร่/ปี (Table 2)

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์แตงที่เกษตรกรในอำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมาปลูกและนำไปใช้ประโยชน์ โดยใช้วิธีการสำรวจชนิดพืชและการสัมภาษณ์เกษตรกร รวบรวมข้อมูลจาก 36 คนในช่วงเดือนกรกฎาคม 2566 ถึง กรกฎาคม 2567 พบว่า มีพืชวงศ์แตง 10 สกุล 13 ชนิดที่เกษตรกรปลูกขาย และแต่ละชนิดมีค่าดัชนีความนิยมปลูก (UV) ต่างกัน เช่น แดงกวางมี UV สูงสุดที่ 1.10 ในขณะที่น้ำเต้าและบวบเหลี่ยมมี UV ต่ำสุดที่ 0.05 นอกจากนี้ การวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการปลูกพันธุ์ที่นิยมมากที่สุด เช่น พันธุ์โนเบล และสีนอ และแสดงให้เห็นถึงรายได้และปริมาณผลผลิตสูงสุดของแต่ละพืช โดยแดงโมมีปริมาณผลผลิตสูงสุดที่ 24.00 ตัน/ไร่/ปี และรายได้สูงสุดที่ 288,000.00 บาท/ไร่/ปี และแดงโมมีค่าเฉลี่ยมูลค่าทางการตลาดสูงสุดคือ 434,160.00 บาท/ไร่/ปี ซึ่งช่วยให้เข้าใจความสำคัญของพืชวงศ์แตงในเชิงเศรษฐกิจและการเพาะปลูก พืชวงศ์แตงในเขตพื้นที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับเป็นแนวทางในการจัดการส่งเสริมการปลูกพืชอาหารในเขตพื้นที่แห่งถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2566 (รหัสโครงการ NRIIS 179327) และผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์เลขที่การรับรอง (รหัส EC-66-83)

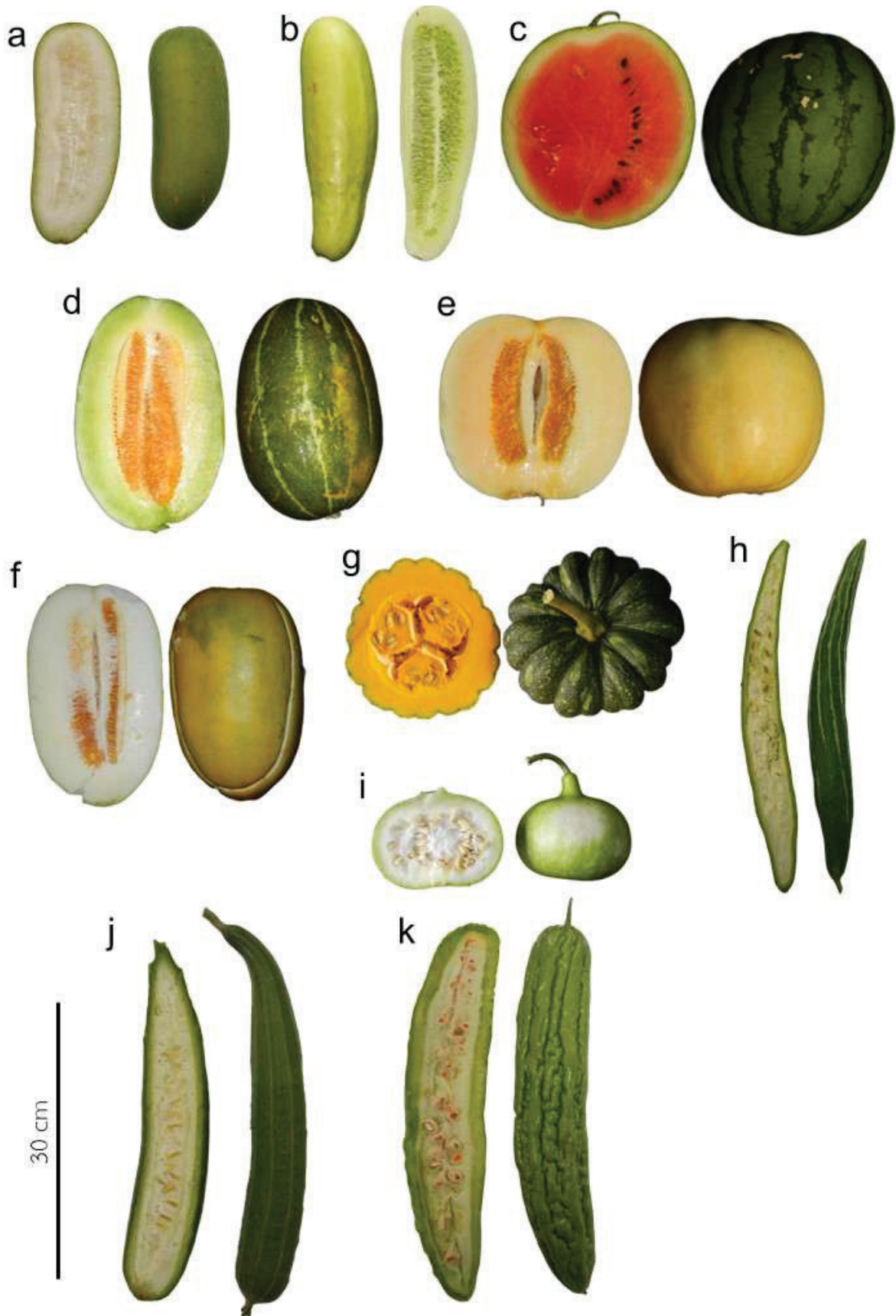


Figure 2. Fruit morphology of some species of Cucurbitaceae cultivated by local farmers in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province. (a) *Benincasa hispida*, (b) *Cucumis sativus*, (c) *Citrullus lanatus*, (d-f) *Cucumis melo*, (g) *Cucurbita moschata* Duchesn ex Poir. , (h) *Trichosanthes cucumerina*, (i) *Lagenaria siceraria*, (j) *Luffa acutangula*, and (k) *Momordica charantia*

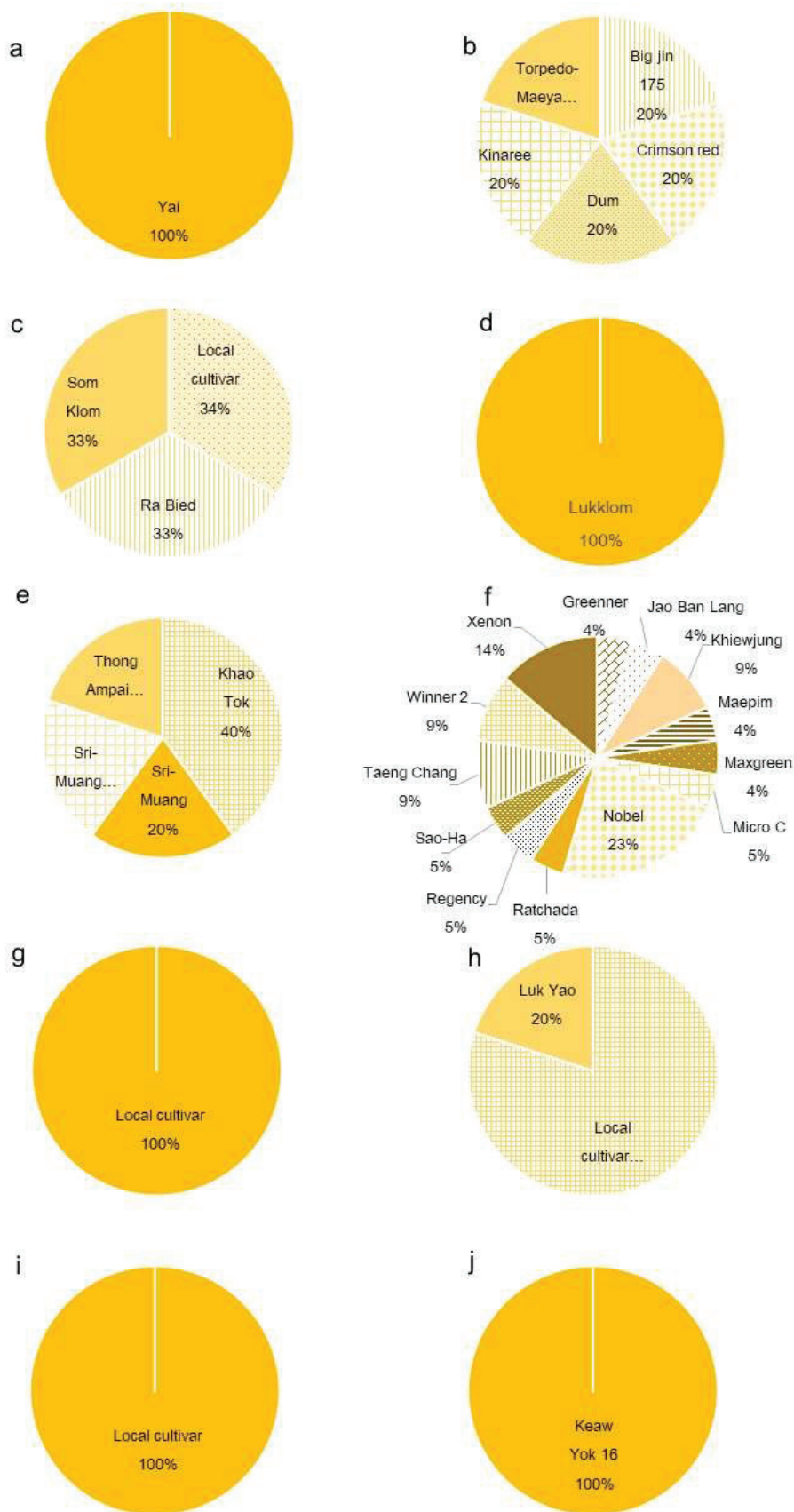


Figure 3. Planting popularity percentage of each species of Cucurbitaceae in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province, (a) *Benincasa hispida*, (b) *Citrullus lanatus*, (c) *Cucumis melo*, (d) *Lagenaria siceraria*, (e) *Cucurbita moschata* Duchesn ex Poir., (f) *Cucumis sativus*, (g) *Luffa acutangular*, (h) *Luffa aegyptiaca*, (i) *Trichosanthes cucumerina*, and (j) *Momordica charantia*.

Table 1 Planting popularity percentage of cultivars, UV, planting area, yield, annual income, and seed source of Cucurbitaceae in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province during July 2023 to July 2024.

Scientific name	Thai name	Cultivars	UV	Planting area	Yield (ton/rai/	Annual income (baht/rai/	Crop planting per year	Number of growers	*Seed source
				(rai)	year)	year)			
				(Min - Max)	(Min - Max)	(Min - Max)			
<i>Benincasa hispida</i> (Thunb.) Cogn.	Fak	Total	0.10	0.01 - 0.13	2.40 - 16.00	21,600.00 - 144,000.00	1	2	C, S
		Yai		0.01 - 0.13	2.40 - 16.00	21,600.00 - 144,000.00	1	2	C, S
<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. & Nakai	Taeng mo	Total	0.25	81.25	54.13	640,250.00	12	5	C
		Kinaree		2.00	4.00	52,000.00	2	1	C
		Crimson red		15.00	24.00	288,000.00	4	1	C
		Dum		0.25	2.00	11,000.00	1	1	C
		Torpedo-Mae ya		60.00	24.00	288,000.00	4	1	C
		Big Jin 175		4.00	0.13	1,250.00	1	1	C
<i>Cucumis melo</i> L.	Taeng thai	Total	0.15	3.00	0.15	1,500.00	3	3	S
		Local cultivar		1.00	0.05	500.00	1	1	S
		Ra Bied		1.00	0.05	500.00	1	1	S
		Som Klom		1.00	0.05	500.00	1	1	S
<i>Cucumis sativus</i> L.	Taeng kwa	Total	1.10	17.81 - 24.85	189.81 - 259.89	3,394,152.49 - 4,833,009.63	75	22	C, S
		Taeng Chang		2.10	28.20	500,000.10 - 500,000.10	1	1	C, S
		Maxgreen		1.00	35.00	630,000.00	7	1	C
		Maepim		3.50	2.86	37,142.86	5	2	C
		Khiewjung		1.00 - 1.75	6.86 - 9.00	68,571.43 - 90,000.00	9	1	C
		Jao Ban Lang		1.00	16.00	320,000.00	4	1	C
		Xenon		0.70 - 3.00	12.86 - 20.00	128,571.43 - 380,000.00	9	1	C
		Greenner		1.00	8.00	160,000.00	2	5	C
		Nobel		0.01 - 3.00	20.00 - 76.80	380,000.00 - 1,536,000.00	6	1	C
		Micro C		0.50	0.10	2,000.00	3	1	C
		Ratchada		3.00	3.33	66,666.67	5	1	C
		Regency		2.00	50.00	1,000,000.00	9	2	C
Winner 2		1.00 - 2.00	5.00 - 9.00	90,000.00 - 100,000.00	9	2	C		
Sao-Ha		1.00	1.60	11,200.00	2	3	C		

Table 1 Planting popularity percentage of cultivars, UV, planting area, yield, annual income and seed source of Cucurbitaceae in Chum Phuang District, Nakhon Ratchasima Province during July 2023 to July 2024. (cont.)

Scientific name	Thai name	Cultivars	UV	Planting area (rai)	Yield (ton/rai/year)	Annual income (baht/rai/year)	Crop planting per year	Number of growers	*Seed source
				(Min - Max)	(Min - Max)	(Min - Max)			
<i>Cucurbita moschata</i> Duchesn ex Poir.	Fak thong	Total	0.25	4.13 - 4.50	8.40 - 10.80	83,200.00 - 112,800.00	4	5	C, S
		Khao Tok		0.13 - 0.50	1.60 - 4.00	10,400.00 - 40,000.00	1	2	C, S
		Thong Ampai 426		1.50	2.40	26,400.00	1	1	C
		Sri-Muang		1.00	2.00	20,000.00	1	1	C
		Sri Muang Thong Yai 050		1.50	2.40	26,400.00	1	1	C
<i>Lagenaria siceraria</i> (Molina) Standl.	Nam-tao	Total	0.05	0.01	16.00	160,000.00	1	1	S
		Lukkloam		0.01	16.00	160,000.00	1	1	S
<i>Luffa acutangula</i> (L.) Roxb.	Buap liam	Total	0.05	0.16-	19.20	192,000.00	3	1	C
		Local cultivar		0.16	19.20	192,000.00	3	1	C
<i>Luffa aegyptiaca</i> Mill.	Buap hom	Total	0.25	0.06 - 0.53	14.00 - 27.20	176,000.00 - 272,000.00	4	5	C, S
		Local cultivar		0.03 - 0.50	6.00 - 19.20	96,000.00 - 192,000.00	3	4	C
		Luk Yao		0.03	8.00	80,000.00	1	1	S
<i>Momordica charantia</i> L.	Ma ra	Total	0.10	2.00 - 8.00	2.50 - 18.00	80,000.00 - 540,000.00	3	2	C
		Keaw Yok 16		2.00 - 8.00	2.50 - 18.00	80,000.00 - 540,000.00	3	2	C
<i>Trichosanthes cucumerina</i> L.	Buap khom	Total	0.10	0.16 - 0.38	5.76 - 8.00	57,600.00 - 128,000.00	3	2	C, S
		Local cultivar		0.16 - 0.38	5.76 - 8.00	57,600.00 - 128,000.00	3	2	C, S

* C = commercial seeds, S = self- collected seeds

Table 2 Economic value of Cucurbitaceae at Chum Phuang, Nakhon Ratchasima during July 2023 to July 2024.

Species	*Total yield (ton/rai/year)	**Unit of standard (baht/kg)	Market value (baht /rai/year)	Number of growers	Average annual income (baht/ household/rai/year)
<i>Benincasa hispida</i> (Thunb.) Cogn.	3.64	22.50	81,818.18	2	40,909.09
<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. & Nakai	22.26	19.50	434,160.00	5	86,832.00
<i>Cucumis melo</i> L.	0.05	16.00	800.00	3	266.67
<i>Cucumis sativus</i> L.	14.14	17.50	247,405.86	22	11,245.72
<i>Cucurbita moschata</i> Duchesn ex Poir.	2.27	30.50	69,243.24	5	13,848.65
<i>Lagenaria siceraria</i> (Molina) Standl.	16.00	18.00	288,000.00	1	288,000.00
<i>Luffa acutangula</i> (L.) Roxb.	19.20	20.00	384,000.00	1	384,000.00
<i>Luffa aegyptiaca</i> Mill.	5.80	42.00	243,563.32	5	48,712.66
<i>Momordica charantia</i> L.	14.90	22.50	335,250.00	2	167,625.00
<i>Trichosanthes cucumerina</i> L.	7.34	47.00	345,035.29	2	172,517.65

* Total yield (ton/rai/year) = The total yield of each type of crop from all growers (ton/rai/year) / the total area cultivated for that crop (rai).

** Unit (Baht/kg), Average price on July 1, 2024 (Department of Internal Trade, 2024)

เอกสารอ้างอิง

กรมการค้าภายใน. (2567). *ราคาขายปลีกและขายส่งสินค้าเกษตร*.
https://pricelist.dit.go.th/main_price.php?seltime=day

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2562). *แตงกวา: ปีเพาะปลูก 2561*.
<http://www.agriinfo.doae.go.th/year62/plant/rortor/veget/24.pdf>

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2563, มีนาคม). *แตงกวา*. <http://www.agriinfo.doae.go.th/year63/plant/rortor/veget/%E0%B9%81%E0%B8%95%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%A7%E0%B8%B2.pdf>

ชูศรี ไตรสนธิ, ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ, ปรัชญา ศรีสง่า, & อังคนา อินตา. (2561). การศึกษาพฤกษศาสตร์พื้นบ้านเชิงปริมาณ. ใน ชูศรี ไตรสนธิ ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ ปรัชญา ศรีสง่า และอังคนา อินตา, *พฤกษศาสตร์พื้นบ้าน ศาสตร์แห่งภูมิปัญญาท้องถิ่น* (พิมพ์ครั้งที่ 1, น. 35). วนิดาการพิมพ์.

คู่สดี พรหมประสิทธิ์, ธัญรัตน์ ประมูลศิลป์, สุวิสา จันทร์โท, & วรชาติ โต. (2562). ความหลากหลายและการใช้ประโยชน์ของพืชในป่าชุมชน บ้านโนนชาด ตำบลท่าลาด อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา. *PSRU Journal of Science and Technology*, 4(3), 37-47.

วิทยา ปองอมรกุล, ชูศรี ไตรสนธิ, ปรีทรรศน์ ไตรสนธิ, & อังคนา อินตา. (2560). *ดัชนีพฤกษศาสตร์พื้นบ้านภาคเหนือ*. วนิดาการพิมพ์.

วรภรณ์ นันทะเสน และ เก นันทะเสน. (2561). มูลค่าการใช้ประโยชน์ทางตรงเพื่อการบริโภคผักพื้นบ้าน. *WMS Journal of Management*, 8(2), 18-29.

ศรภา สุทรินทร์. (2564). การปรับบทบาทสู่การเป็นผู้ค้าเมล็ดพันธุ์ของเกษตรกร ความท้าทายในการเรียนรู้และทำความเข้าใจกฎหมายที่เกี่ยวข้อง. *Journal of Agricultural Research and Extension*, 39(1), 1-12.

ศูนย์วิทยบริการเพื่อส่งเสริมการเกษตร. (2561). *Cucumber*. <https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2018/11/Cucumber.pdf>

De Wilde, W. J. J. O., & Duyfjes, B. E. E. (2008). Cucurbitaceae. *Flora of Thailand*, 9(4), 411-546.

Forest and Plant Conservation Research Office. (2024). *Thai Plant Names*. <https://botany.dnp.go.th/mplant/index.html>

Kong, Q., Zheng, Y., Zhang, J., & Bai, Y. (2023). Editorial: Cucurbitaceae: multi-omics, functional analysis, and molecular breeding. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1301212. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1301212>

Kumar, P., Pandey, D. K., Singh, P., & Adhiguru, P. (2021). Vocal for local: Diversity of local cucurbits cultivars in East Siang, Arunachal Pradesh. *Indian Journal of Traditional Knowledge (IJTK)*, 20(1), 174-179.

- Mathew, D. (2022). Omics in vegetable crops: Cucurbitaceae and Amaryllidaceae. In *Omics in Horticultural Crops* (pp. 239-280). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89905-5.00005-7>
- POWO. (2024). *Plants of the World Online*. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Schaefer, H., Heibl, C., & Renner, S. S. (2009). Gourds afloat: A dated phylogeny reveals an Asian origin of the gourd family (Cucurbitaceae) and numerous oversea dispersal events. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276, 843-851.
- Schaffer, A. A., & Paris, H. S. (2003). Melons, squashes, and gourds. In *Encyclopedia of food sciences and nutrition* (pp. 3817-3826). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03426-0>
- Simpson, M. G. (2010). Diversity and Classification of Flowering Plants: Eudicots. In *Plant Systematics* (2nd ed., pp. 275-448). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374380-0.50008-7>
- Wang, H. (Ed.). (2023). *Biological and Abiotic Stress in Cucurbitaceae Crops*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104275>
- Yiblet, Y. (2023). Overview of Cucurbitaceae Families. In *Biological and Abiotic Stress in Cucurbitaceae Crops*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001306>

ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีท *Streptomyces* sp. PM-R01 ที่แยกได้จากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดจันทบุรี

Antibacterial activity of endophytic actinomycetes, *Streptomyces* sp. PM-R01, isolated from native durian varieties in Chanthaburi province

วิญญู ปักดี^{1*} และ จิรภัทร จันทมาลี²

Winyou Puckdee^{1*} and Jirapat Chanthamalee²

Received: 12 July 2024 ; Revised: 9 August 2024 ; Accepted: 10 September 2024

บทคัดย่อ

ปัญหาการดื้อยาของแบคทีเรียส่งผลกระทบต่อทั่วโลก ขณะเดียวกันสถานการณ์ระดับโลกพบว่าการค้นพบยาชนิดใหม่ๆ มีอัตราที่น้อยลง หนึ่งในแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สามารถพัฒนาเป็นยาได้มาจากเชื้อกลุ่มแอกติโนมัยซีท วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อแยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดจันทบุรีที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียบางชนิดได้ และระบุชนิดของแอกติโนมัยซีทนั้น วิธีการศึกษาประกอบด้วยการแยกเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากเนื้อเยื่อทุเรียนด้วยการฆ่าเชื้อที่พื้นผิว จากนั้นทดสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียเบื้องต้นด้วยวิธีการขีดขวางและเลือกแอกติโนมัยซีทที่มีฤทธิ์ดีที่สุดสำหรับสกัดสารสกัดหยาบเพื่อใช้หาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียทดสอบ (MIC และ MBC) ด้วยวิธี Broth microdilution และทำการระบุชนิดแอกติโนมัยซีทด้วยการศึกษาฐานพันธุกรรมและวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ผลการวิจัยพบว่าสามารถแยกเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทได้ทั้งหมด 10 ไอโซเลท โดยมีเฉพาะเชื้อไอโซเลท PM-R01 ที่สามารถยับยั้งเชื้อ *Bacillus cereus* TISTR 2372 และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 ได้และมีระยะยับยั้งเฉลี่ยเท่ากับ 14.33 ± 2.33 และ 13.00 ± 1.00 mm ตามลำดับ หลังการสกัดสารสกัดหยาบพบว่าสารสกัดมีค่า MIC มากกว่า 1,024 $\mu\text{g/ml}$ และที่ความเข้มข้นเดียวกันนี้สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 เมื่อทำการระบุชนิดพบว่าเชื้อไอโซเลท PM-R01 มีความคล้ายกับเชื้อ *Streptomyces ardesiacus* NRRL B-1773^T ที่ร้อยละ 99.65 ผลการวิจัยทั้งหมดสรุปได้ว่าเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 ซึ่งคล้ายกับเชื้อ *Streptomyces ardesiacus* มีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกบางชนิดได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาและพัฒนาสารสกัดหยาบของเชื้อนี้เพิ่มเติมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

คำสำคัญ: เอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีท, ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย, ทุเรียนพันธุ์พื้นเมือง, จันทบุรี, *Streptomyces ardesiacus*

Abstract

Background: The emergence of antibiotic-resistant bacteria poses a global health crisis, exacerbated by the declining rate of novel antibiotic discovery. Actinomycetes, bacteria renowned for producing diverse bioactive compounds, offer a promising source of potential drug leads. **Objective:** This study aimed to isolate and identify endophytic actinomycetes from native durian (*Durio zibethinus* L.) cultivars in Chanthaburi Province, Thailand, to evaluate their antibacterial activity. **Methods:** Endophytic actinomycetes from durian tissue were isolated using surface sterilization. Antibacterial activity was assessed through a Perpendicular streak method.

¹ อาจารย์, สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี 22000

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี 22000

¹ Lecturer, Division of Microbiology, Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000

² Assistant Professor, Division of Microbiology, Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000

* Corresponding author: Winyou Puckdee, Division of Microbiology, Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Mueang, Chanthaburi 22000 Email: winyou.p@rbru.ac.th

The most effective isolate underwent crude extract preparation and determination of MIC and MBC values against test bacteria via broth microdilution. Identification of the active isolate was conducted using morphological traits and 16S rRNA gene sequencing. **Results:** Ten isolates of endophytic actinomycetes were obtained from native durian varieties in Chanthaburi Province, Thailand. Among these, only isolate PM-R01 exhibited antibacterial activity against *Bacillus cereus* TISTR 2372 and *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, with average inhibition zones of 14.33 ± 2.33 mm and 13.00 ± 1.00 mm, respectively. The MIC of PM-R01 crude extract was above 1,024 $\mu\text{g/ml}$. At this concentration, the extract achieved 98% bacterial kill. The identification of PM-R01 revealed 99.65% similarity to *Streptomyces ardesiacus* NRRL B-1773^T. **Conclusion:** These findings suggest that PM-R01 is *Streptomyces ardesiacus* as a promising source for antibacterial agents. Further studies are needed to elucidate the extract's composition and evaluate PM-R01's efficacy against a broader range of microorganisms.

Keywords: Endophytic actinomycete, antibacterial activity, native durian varieties, Chanthaburi Province, *Streptomyces ardesiacus*

บทนำ

การดื้อยาปฏิชีวนะของแบคทีเรียหลายชนิดเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อทั่วโลก เป็นปรากฏการณ์ที่ทั้งเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและเกิดจากความกดดันจากการใช้ยาปฏิชีวนะที่ไม่เหมาะสม ปัจจุบันสามารถพบเชื้อที่สามารถดื้อยาปฏิชีวนะได้มากกว่า 2 กลุ่ม ซึ่งหากไม่สามารถควบคุมหรือชะลอการดื้อยาได้อาจทำให้วงการสาธารณสุขมีลักษณะเหมือนย้อนกลับไปสู่ยุคก่อนการพบยาปฏิชีวนะได้ ทำให้เกิดปัญหาใหญ่กับระบบสาธารณสุขจนอาจถึงกับเป็นความล้มเหลวของระบบสาธารณสุขในอนาคตได้ (World Health Organization, 2022) ขณะเดียวกันสถานการณ์ระดับโลกพบว่ายาปฏิชีวนะชนิดใหม่ (ยาตัวใหม่) ถูกค้นพบได้ในอัตราที่น้อยลงมาก (Ventola, 2015) จนไม่ทันต่อการต่อสู้กับเชื้อที่ดื้อยา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องหาสารและแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ๆ เพื่อแก้ไขหรือลดความรุนแรงของสถานการณ์การดื้อยานี้ โดยสารออกฤทธิ์เหล่านี้ต้องมีประสิทธิภาพในการรักษาทดแทนยาปฏิชีวนะชนิดเดิมที่มีเชื้อดื้อยาไปแล้ว

แอกติโนมัยซีท (Actinomycetes) เป็นจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งที่มีการศึกษามาก เนื่องจากสามารถสร้างสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary metabolites) ได้ในจำนวนมาก (Bérdy, 2005) และมักเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) มีฤทธิ์ต่างๆ เช่น ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial) ต้านมะเร็ง (Anticancer) ต้านการอักเสบ (Anti-Inflammatory) หรือแม้แต่ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นต้น แอกติโนมัยซีทมักพบในดินและในระบบนิเวศต่างๆ เช่น ในดินรอบรากพืชในน้ำจืด ในน้ำทะเล ในถ้ำ นอกจากนี้ยังพบได้ภายในเนื้อเยื่อสัตว์หรือเนื้อเยื่อพืชโดยในเนื้อเยื่อพืชสามารถพบได้จากส่วนราก เหง้า ต้น กิ่ง ใบ หรือแม้แต่ในส่วนของผล เรียกเชื้อแอกติโนมัยซีทที่พบในเนื้อเยื่อพืชและไม่ก่ออันตรายต่อเนื้อเยื่อ

ของพืชว่าแอกติโนมัยซีทไฟติกแอกติโนมัยซีท (Endophytic actinomycetes) ซึ่งสามารถแยกให้เป็นเชื้อบริสุทธิ์และสามารถสร้างสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิที่มีประโยชน์ได้ (Wink *et al.*, 2017)

จากอดีตถึงปัจจุบันมีรายงานการศึกษาเชื้อแอกติโนมัยซีทในดินอย่างแพร่หลายมาก ซึ่งยากที่จะพบเชื้อชนิดใหม่หรือสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิชนิดใหม่ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาเชื้อแอกติโนมัยซีทจากพืชในท้องถิ่น ประกอบกับทุเรียนเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี และยังมี การปลูกทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองด้วย ซึ่งมีลักษณะเด่นคือทั้งแข็งแรง ทนต่อโรค อายุยืน ทนต่อสภาพอากาศและศัตรูพืช และจากการศึกษารายงานการแยกเชื้อแอกติโนมัยซีทจากพืชพบว่ายังมีผู้ที่สนใจแยกเชื้อจากทุเรียนไม่มาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเชื้อแอกติโนมัยซีทจากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดจันทบุรี และศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อก่อโรคในมนุษย์บางชนิด

วัตถุประสงค์และวิธีการศึกษา

1. การแยกเชื้อแอกติโนมัยซีทไฟติกแอกติโนมัยซีทจากใบ กิ่ง และรากของทุเรียนพันธุ์กระปุกทองดี นกหยิบ และพวงมณี ด้วยวิธี **Surface sterilization**

นำตัวอย่างชิ้นส่วนใบ กิ่ง และรากของทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองที่เก็บจากอำเภอขลุง อำเภอเมือง และอำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี พันธุ์ละ 5 ตัวอย่าง จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำประปา 1 ครั้ง และล้างต่อด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นตัดตัวอย่างให้ได้ขนาดประมาณ 1.0×1.0 cm แล้วแช่ตัวอย่างในสารละลาย 0.1% (v/v) Tween 20 นาน 1 นาที แช่ใน 70% (v/v) Alcohol นาน 5 นาที แช่ใน 6% (v/v) Sodium hypochlorite นาน 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อจำนวน 3 น้ำๆ ละ 30 วินาที และแช่ใน 10% (w/v) Sodium

bicarbonate นาน 10 นาที ตามลำดับ แล้วผึ่งตัวอย่างให้แห้งบนผ้าขาวบางปลอดเชื้อ นำน้ำกลั่นที่ใช้ล้างชิ้นตัวอย่างน้ำที่สามปริมาณ 200 µl เกลี่ยลงบนอาหาร International *Streptomyces* Project-2 agar (ISP-2 agar) (Shirling & Gottlieb, 1966) และนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่พื้นผิวแล้ว ป้ายบนอาหาร ISP-2 agar เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อที่พื้นผิว ซึ่งไม่ควรมีเชื้อใดๆ เจริญ จากนั้นวางชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่พื้นผิวแล้วลงบนอาหาร Humic acid vitamin (HV) agar (Otoguro *et al.*, 2001) บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 3-4 สัปดาห์ สังเกตการเจริญของเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทรอบชิ้นเนื้อเยื่อพืช ซึ่งมีลักษณะคล้ายผงแป้ง ทำการแยกเชื้อให้ได้เชื้อบริสุทธิ์บนอาหาร ISP-2 agar และเก็บเชื้อในรูปแบบของสารแขวนลอยสปอร์ของเชื้อที่บริสุทธิ์ใน 20% (v/v) Glycerol ที่อุณหภูมิ -70 °C

2. การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการขีดขวาง (Perpendicular streak method)

นำเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทที่คัดแยกได้ขีดลงบนอาหาร Muller hinton agar (MHA) โดยใช้พื้นที่ 1 ใน 4 ส่วนของเพลต บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C นานอย่างน้อย 3 วัน หรือนานกว่าเชื้อจะสร้างสปอร์ และเตรียมเชื้อแบคทีเรียทดสอบก่อนวันทดสอบ 24 ชั่วโมง ได้แก่เชื้อ *B. cereus* TISTR 2372, *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922 และ *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 28753 ในอาหาร Nutrient broth (NB) จากนั้นทำการปรับความเข้มข้นของเชื้อด้วยสารละลาย 0.85 % (w/v) NaCl โดยให้มีความขุ่นเท่ากับ McFarland standards No. 0.5 จะได้ความเข้มข้นของเซลล์ประมาณ 1.5×10^8 CFU/ml จากนั้นใช้ไม้พันสำลีขนาดมาตรฐานปลอดเชื้อชุบเชื้อทดสอบ แล้วขีดตั้งฉากห่างจากรอยขีดของเชื้อแอกติโนมัยซีท 0.5 cm โดยขีดยาวประมาณ 4 cm บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการเจริญและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) ส่วนชุดควบคุมมีเฉพาะเชื้อทดสอบเท่านั้น

3. การสกัดสารสกัดหยาบจากเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบได้

นำเชื้อแอกติโนมัยซีทที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบได้ดีที่สุดจำนวน 1 ไอโซเลท Streak ให้เต็มผิวหน้าอาหาร ISP-2 agar จำนวน 200 เพลต บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C นานจนกว่าเชื้อจะสร้างสปอร์ จากนั้นตัดอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเชื้อเจริญด้วยใบมีดให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก ใส่ลงในโหลแก้วให้ได้ประมาณ 1 ใน 3 ส่วนของโหล แล้วเติมตัวทำละลาย Ethyl acetate ให้ท่วมชิ้นวัน ปิดฝาให้แน่น แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มากรองผ่านสำลีและกระดาษกรอง Whatman

No. 1 แล้วนำไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่อง Rotary vacuum evaporator ให้เหลือแต่สารสกัดหยาบ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกลักษณะของสารสกัดหยาบ

4. การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียทดสอบของสารสกัดหยาบจากเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีท

4.1 การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบ (Minimal inhibitory concentration, MIC)

ทำการทดลองตามมาตรฐานของ CLSI (2018) เริ่มจากเตรียมสารสกัดหยาบของเชื้อแอกติโนมัยซีทโดยละลายให้สมบูรณ์ด้วยสารละลาย Dimethyl sulfoxide (DMSO) และเตรียมให้ได้ความเข้มข้นเป็น 2 ถึง 2,048 µg/ml โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller hinton broth (MHB) ใน 96 well plate ปริมาตร 100 µl ต่อหลุม จากนั้นเตรียมเชื้อแบคทีเรียทดสอบด้วยอาหาร MHB ให้มีความเข้มข้นเป็น 2×10^5 CFU/ml และเติมลงในแต่ละหลุมปริมาตร 100 µl จะได้ความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 1 ถึง 1,024 µg/ml ตามลำดับ โดยมีปริมาตรรวมเป็น 200 µl บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้ยา Gentamicin ในช่วงความเข้มข้น 0.015625 ถึง 16.00 µg/ml เป็นชุดควบคุมบวก (Positive control) และใช้สารละลาย DMSO ความเข้มข้นร้อยละ 5 (v/v) เป็นชุดควบคุมลบ (Negative control) สังเกตการเจริญของเชื้อในแต่ละหลุม หากเชื้อเจริญจะทำให้อาหารขุ่น โดยหลุมที่ใส (ไม่ขุ่น) หลุมใดมีความเข้มข้นของสารสกัดต่ำสุด ให้รายงานค่าความเข้มข้นของหลุมนั้นเป็นค่า MIC ในหน่วย µg/ml ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4.2 การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทดสอบ (Minimal bactericidal concentration, MBC) และค่าร้อยละของการฆ่าเชื้อของสารสกัดหยาบ

หลังหาค่า MIC แล้ว ทำการดูดสารแขวนลอยของเชื้อทดสอบในทุกหลุมที่ไม่ขุ่นปริมาตรหลุมละ 10 µl แล้วทำการเกลี่ยลงบนอาหาร Trypticase soy agar (TSA) แต่หากขุ่นทั้งหมดให้ใช้ทุกหลุมที่มีสารสกัดหยาบเข้มข้นสูงสุดแทน บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบการเจริญเป็นโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียทดสอบ โดยสารแขวนลอยจากอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีการเจริญเป็นโคโลนีหลุมใดมีความเข้มข้นของสารสกัดต่ำสุดให้รายงานความเข้มข้นของหลุมนั้นเป็นค่า MBC ในหน่วย µg/ml แต่หากพบการเจริญเป็นโคโลนีให้นับจำนวนโคโลนีแล้วทำการคำนวณหาค่าร้อยละของความสามารถในการฆ่าเชื้อของสารสกัดหยาบในความเข้มข้นนั้นๆ แล้วรายงานค่า MBC ของความเข้มข้นนั้นๆ พร้อมค่าร้อยละของความสามารถในการฆ่าเชื้อ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

5. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทที่คัดเลือกโดยเตรียมสไลด์ด้วยวิธี Slide culture

ทำการเลี้ยงเชื้อแอกติโนมัยซีทที่ต้องการศึกษาที่ด้านข้างทั้ง 4 ด้านของอาหาร ISP-2 agar รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดด้านละ 0.5 cm ซึ่งวางบนสไลด์แก้วแล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์วางทั้งหมดในจานเพาะเชื้อที่ปราศจากเชื้อพร้อมสำลีให้ความชื้น บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C สังเกตการเจริญของเชื้อหรือจนกว่าเชื้อจะสร้างสปอร์ จากนั้นนำกระจกปิดสไลด์ออกแล้วนำด้านที่มีเชื้อวางบนหยดสี Lactophenol cotton blue ตรงกลางของสไลด์แผ่นใหม่ นำสไลด์ไปสังเกตลักษณะของเชื้อภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พร้อมบันทึกภาพและใส่สเกลในภาพเพื่ออ้างอิงขนาด

6. การศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA และการสร้าง Phylogenetic tree เพื่อระบุชนิดของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีท

เลี้ยงเชื้อแอกติโนมัยซีทที่ต้องการศึกษาในอาหาร ISP-2 broth สังเกตการเจริญของเชื้อเพื่อนำไปสกัดดีเอ็นเอด้วยการต้มตามวิธีของ Cook and Meyers (2003) แล้วเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอในส่วนของยีน 16S rRNA ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส (Polymerase chain reaction; PCR) โดยใช้ Primer 27F (5'-GAGTT TGATCCTGGCTCAG-3') และ 1525R (5'-AAGGAGG TGATCCAGCC-3') (Chun & Goodfellow, 1995) ใช้อุณหภูมิ Denaturation เป็น 94 °C นาน 30 วินาที ใช้อุณหภูมิ Annealing เป็น 56 °C นาน 30 วินาที และใช้อุณหภูมิ Extension เป็น 72 °C นาน 1 นาที 45 วินาที ทำปฏิกิริยาจำนวน 30 รอบ ตรวจสอบผลผลิต PCR โดยการทำให้ Gel electrophoresis ผลผลิต PCR ที่ได้นำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยชุดน้ำยา GenepHlow™ PCR Cleanup Kit (Geneaid, Taiwan) แล้วตรวจสอบผลผลิต Purified PCR โดยการทำให้ Gel electrophoresis อีกครั้ง จากนั้นนำผลผลิต Purified PCR ไปหาลำดับนิวคลีโอไทด์ (Sequencing) ที่บริษัท 1st Base ประเทศมาเลเซีย โดยใช้ Primer ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ 27F, 692F, 800R และ 1492R นำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้มาประกอบรวมลำดับให้สมบูรณ์ แล้ววิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูล Genbank และ EzBioCloud เพื่อให้ทราบถึงสกุลและชนิดที่ใกล้เคียงของเชื้อแอกติโนมัยซีท จากนั้นนำผลที่ได้จากการ BLAST มาสร้าง Phylogenetic tree

ด้วยโปรแกรม MEGA v7.0 ด้วยวิธี Neighbor-Joining (NJ) และใช้ค่า Bootstrap เป็น 1000

ผลการศึกษา

1. เชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทที่แยกได้จากใบ กิ่ง และรากของทุเรียนพันธุ์กระปุกทองดี นกหยิบ และพวงมณีที่ผ่านการทำ Surface sterilization

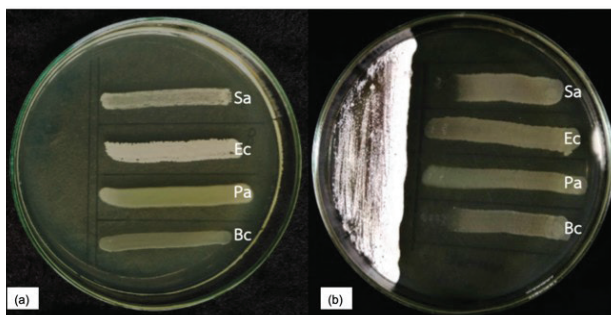
การแยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากใบ กิ่ง และรากของทุเรียนพันธุ์พื้นเมือง ได้แก่ กระปุกทองดี นกหยิบ และพวงมณี ที่ผ่านการทำ Surface sterilization บนอาหาร HV agar พบเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทเจริญออกจากเนื้อเยื่อของทุเรียนซึ่งเป็นเส้นใยและสปอร์ขนาดเล็กมีลักษณะคล้ายผงแป้งสีขาว เหลือง เทา หรือสีชมพู สามารถแยกเชื้อได้ทั้งหมด 10 ไอโซเลท โดยได้จากพันธุ์พวงมณีและกระปุกทองดีจำนวน 7 และ 3 ไอโซเลท ตามลำดับ แต่ไม่สามารถแยกได้จากพันธุ์นกหยิบ ซึ่งได้จากกิ่งของพันธุ์พวงมณีมากที่สุดจำนวน 4 ไอโซเลท คิดเป็นร้อยละ 40 แสดงใน Table 1 ลักษณะของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีททั้งหมดมี Aerial hyphae เป็นสีขาวหรือสีเทา Substrate hyphae ทั้งหมดมีสีเหลืองอ่อน สปอร์มีทั้งสีขาว เทา และดำ ส่วนโคโลนีมีสีขาวและเหลืองอ่อน

2. ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบด้วยวิธีการขีดขวาง (Perpendicular streak method)

เมื่อนำเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีททั้งหมดมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียบางชนิด กลุ่มแกรมบวก ได้แก่ เชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 กลุ่มแกรมลบ ได้แก่ เชื้อ *E. coli* ATCC 25922 และ *P. aeruginosa* ATCC 28753 ด้วยวิธีขีดขวางพบเชื้อเพียงไอโซเลทเดียว คือ PM-R01 ที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ แสดงใน Figure 1 โดยมีระยะการยับยั้งเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 อยู่ในช่วง 13.00 ถึง 16.00 mm ค่าเฉลี่ยคือ 14.33 ± 2.33 mm และมีระยะการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ATCC 25923 อยู่ในช่วง 12.00 ถึง 14.00 mm ค่าเฉลี่ยคือ 13.00 ± 1.00 mm แต่ไม่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *E. coli* ATCC 25922 และ *P. aeruginosa* ATCC 28753 ได้ ดังนั้นจึงเลือกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

Table 1 The endophytic actinomycetes were isolated from leaf, branch and root of native durian varieties (Krapookthongdee, Nokyib and Phuangmanee) by surface sterilization technique.

Native durian varieties	Part of plant			Total
	Leaf	Branch	Root	
Krapookthongdee	KP- L01	KP- S02	KP- R01	3
Nokyib	-	-	-	0
Phuangmanee	PM-L01	PM-S01	PM-R01	7
	PM-L02	PM-S02		
		PM-S03		
		PM-S04		
Total	3	5	2	10

**Figure 1** Preliminary screening for antibacterial activity.

Control was the plate without actinomycetes (a) and 7-day-old endophytic actinomycetes (PM-R01) against *S. aureus* ATCC 25923 (Sa), *E. coli* ATCC 25922 (Ec), *P. aeruginosa* ATCC 28753 (Pa), and *B. cereus* TISTR 2372 (Bc) by Perpendicular streak method (b).

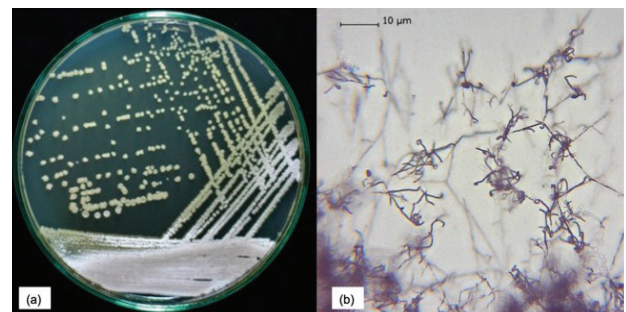
3.ฤทธิ์ยับยั้งและฆ่าเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 ของสารสกัดหยาบจากเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01

นำเชื้อแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 มาทำการสกัดให้ได้สารสกัดหยาบโดยใช้ Ethyl acetate เป็นตัวทำละลาย หลังการสกัดพบว่าได้สารสกัดหยาบเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม เมื่อนำมาเจือจางและทดสอบหาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 พบว่าไม่สามารถยับยั้งเชื้อทั้งสองในช่วงความเข้มข้น 1 – 1,024 µg/ml ได้ จึงระบุค่า MIC ได้ว่ามากกว่า 1,024 µg/ml แต่หลังจากถ่ายสารแขวนลอยของเชื้อที่มีสารสกัดหยาบความเข้มข้น 1,024 µg/ml ลงบนอาหาร Trypticase soy agar (TSA) แล้วทำการเกลี่ยเชื้อ พบว่าแบคทีเรียทดสอบเจริญได้ โดยพบโคโลนีของเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 อยู่ในช่วง 2 - 3 โคโลนี เฉลี่ย 2.67 ± 0.58 โคโลนี ส่วนเชื้อ *S. aureus* ATCC 25923 พบโคโลนีอยู่ในช่วง 15 - 23 โคโลนี เฉลี่ย 18.00 ± 4.36

โคโลนี หลังนำจำนวนโคโลนีมาคำนวณหาค่าร้อยละของการฆ่าเชื้อสามารถระบุได้ว่าสารสกัดหยาบที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,024 µg/ml สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 ได้ที่ร้อยละ 99.73 และ 98.20 ตามลำดับ หรือสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ภายหลังสัมผัสกับสารสกัดหยาบที่ความเข้มข้น 1,024 µg/ml (MBC มากกว่า 1,024 µg/ml)

4. ลักษณะสัณฐานวิทยาของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01

เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเชื้อแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 พบว่าโคโลนีของเชื้อนี้เมื่ออายุน้อยมีสีเหลือง มีการสร้าง Substrate mycelium เป็นสีเหลืองและขาว และ Aerial mycelium เป็นสีเทา ดัง Figure 2(a) เมื่อสังเกตลักษณะเส้นใยของเชื้อภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าสายสปอร์เรียงตัวแบบ Whorls และมีแขนงแบบ Umbels ที่เรียกว่า Verticillati แสดงใน Figure 2(b)

**Figure 2** Cultural and morphological characteristics of the endophytic actinomycete isolate PM-R01. Cultural characteristic of isolate PM-R01 on ISP-2 agar after 7 days (a). Microscopic characteristics of isolate PM-R01 observed through a light microscope (b).

5. ชนิดของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 ที่ได้จากการศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA และการสร้าง Phylogenetic tree

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอของยีน 16S rRNA ด้วยการทำ PCR พบว่าได้ผลผลิต PCR ขนาดประมาณ 1,500 bp โดยเปรียบเทียบกับ DNA marker และเมื่อส่งผลผลิต PCR ที่บริสุทธิ์แล้วไปหาลำดับนิวคลีโอไทด์ พบว่าได้ลำดับนิวคลีโอไทด์จำนวน 1,522 เบส จากนั้นนำลำดับนิวคลีโอไทด์ดังกล่าวไปฝากไว้ในฐานข้อมูล Genbank ได้ Accession

number คือ LC381944 และทำการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้กับลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูล Genbank และ EzBioCloud พบว่าเชื้อนี้จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* และมีความใกล้เคียงกับเชื้อ *Streptomyces ardesiacus* NRRL B-1773 (Type strain) ที่ร้อยละ 99.65 และเมื่อทำการสร้างและวิเคราะห์ Phylogenetic tree โดยใช้เชื้อ *Kitasatospora setae* KM 6054 (Type strain) เป็น Outgroup ได้ผลดัง Figure 3

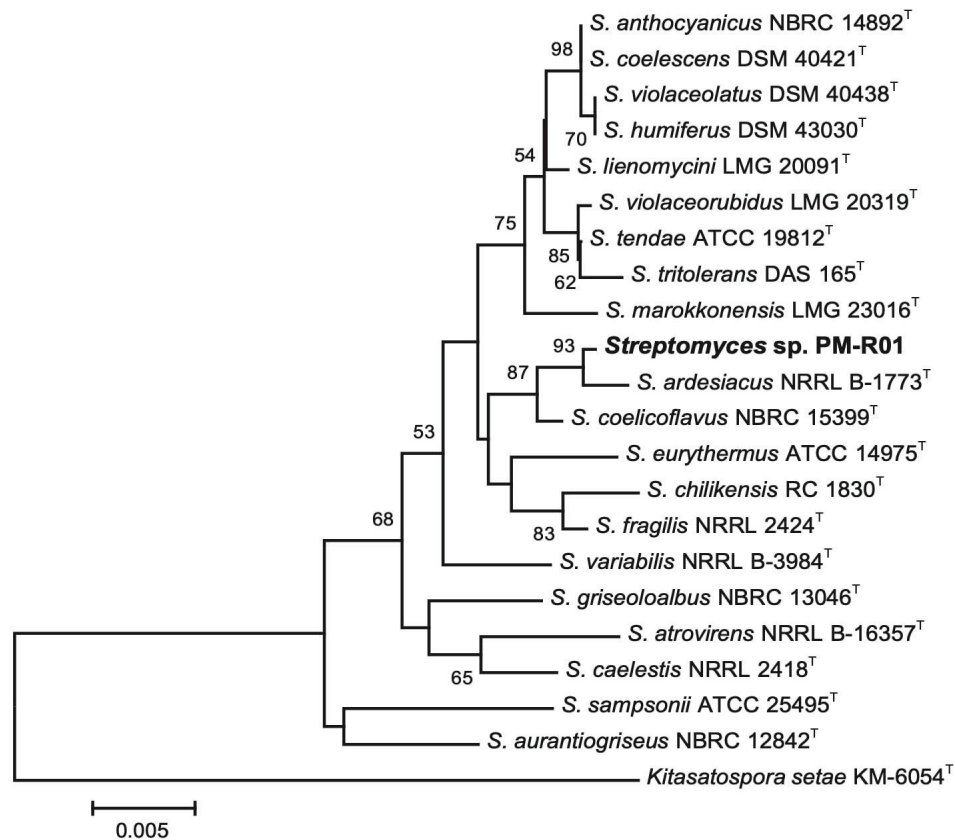


Figure 3 Phylogenetic tree based on nearly completed 16S rRNA gene sequences showing the relative positions of isolate PM-R01 and its closest type strains of *Streptomyces* species. The tree was constructed using the neighbour-joining (NJ) method. Bar indicates the nucleotide substitutions per site.

วิจารณ์และสรุปผล

การแยกเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดจันทบุรี ได้แก่พันธุ์กระปุกทองดี นกหยิบ และพวงมณี จากส่วนใบ กิ่ง และราก ด้วยการฆ่าเชื้อที่ผิวเนื้อเยื่อ และวางเนื้อเยื่อบนอาหาร HV agar พบว่าสามารถแยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทได้ทั้งหมด 10 ไอโซเลท โดยแยกได้จากพันธุ์พวงมณี จำนวน 7 ไอโซเลท คิดเป็นร้อยละ 70 ได้จากส่วนใบ 2 ไอโซเลท กิ่ง 4 ไอโซเลท และราก 1 ไอโซเลท ได้จากพันธุ์กระปุกทองดี จำนวน 3 ไอโซเลท

คิดเป็นร้อยละ 30 โดยได้จากแต่ละส่วนๆ ละ 1 ไอโซเลท แต่ไม่สามารถแยกได้จากทุเรียนพันธุ์นกหยิบ โดยสรุปสามารถแยกเชื้อได้มากที่สุดจากกิ่งของพันธุ์พวงมณีจำนวน 4 ไอโซเลท คิดเป็นร้อยละ 40 และเพื่อเป็นการยืนยันว่าเชื้อแอกติโนมัยซีทที่แยกได้นั้นเป็นเชื้อเอนโดไฟต์จริงจึงตรวจสอบด้วยการนำน้ำกลั่นที่ใช้เป็นน้ำล้างเนื้อเยื่อหน้าที่ 3 จากการทำให้ Surface sterilization ปริมาตร 200 μ l ทำการเกลี่ยบนอาหาร ISP-2 agar และการนำชิ้นเนื้อเยื่อที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อที่ผิวแล้วมาป้ายหรือกลิ้งบนอาหาร ISP-2 agar แล้วบ่มที่อุณหภูมิ

ห้องเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งจากการทดลองไม่พบเชื้อใดๆ เจริญบนอาหารทดสอบ ทำให้เชื่อได้ว่าเชื้อแอกติโนมัยซีทที่แยกได้นั้นเป็นเชื้อกลุ่มเอนโดไฟติกจริง (Mingma *et al.*, 2014) การวิจัยนี้ผู้วิจัยแยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทได้ในจำนวนที่ไม่มาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากผู้วิจัยไม่ได้ทำการบดตัวอย่างเนื้อเยื่อของทุเรียนก่อนนำไปทำการแยกเชื้อบนอาหารที่เหมาะสมอย่างเช่นงานวิจัยของ Mingma *et al.* (2014) จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้เชื้อออกจากเนื้อเยื่อพืชได้ยากและทำให้ปริมาณเชื้อที่แยกได้จากเนื้อเยื่อของทุเรียนน้อย

การแยกเชื้อที่ได้ในจำนวนที่ไม่มากนักคล้ายกับงานวิจัยของ Gos *et al.* (2017) ที่แยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากพืชสมุนไพรชื่อ *Vochysia divergens* ในประเทศบราซิล ได้เชื้อจำนวน 10 ไอโซเลท และจัดอยู่ใน 8 สกุล ประกอบด้วยสกุล *Actinomadura* (2 ไอโซเลท), *Aeromicrobium*, *Microbacterium*, *Microbispora* (2 ไอโซเลท), *Micrococcus*, *Sphaerisporangium*, *Streptomyces* และ *Williamsia*

หลังทดสอบฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทดสอบในเบื้องต้น พบว่าเฉพาะเชื้อแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 ได้ แต่ไม่มีไอโซเลทใดเลยที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่เชื้อ *E. coli* ATCC 25922 และ *P. aeruginosa* ATCC 28753 ซึ่งอาจเป็นเพราะแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยชั้นของ Peptidoglycan เพียงอย่างเดียวซึ่งไม่ซับซ้อนทำให้สารเมแทบอลิท์ทุติยภูมิที่เชื้อแอกติโนมัยซีทสร้างขึ้นผ่านเข้าไปในเซลล์ได้ง่าย ในขณะที่แบคทีเรียแกรมลบมีองค์ประกอบของผนังเซลล์ที่ซับซ้อนกว่าที่ประกอบด้วยชั้น Outer membrane, Periplasmic space และ Peptidoglycan ซึ่งกันหรือขัดขวางไม่ให้สารต่างๆ เข้าสู่เซลล์ได้ง่าย (Madigan *et al.*, 2009) โดยผลยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียทดสอบของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taechowisan *et al.* (2017) ที่แยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากต้นกระชาย (*Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf A.) ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งเฉพาะแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *S. aureus* ATCC 25932, *B. cereus* ATCC 7064 และ *B. subtilis* ATCC 6633 ได้เช่นกัน หรือกรณีที่แยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากต้นกระเทียม (*Zingiber zerumbet* (L.) Smith) คือเชื้อ *Streptomyces zerumbet* W14 พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้งเฉพาะแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *S. aureus* ATCC 25923 และ Methicillin Resistance *S. aureus* (MRSA) Sp6 (Clinical isolate) เช่นกัน (Taechowisan *et al.*, 2019)

เมื่อทำการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเชื้อแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 โดยใช้ Ethyl acetate

เป็นตัวทำละลาย เนื่องจาก Ethyl acetate เป็นสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารขั้วกลางซึ่งจะสามารถดึงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีขั้วกลางด้วยกันออกมาได้มากและง่ายต่อการระเหยตัวทำละลายออก (Asmah *et al.*, 2020; Darya *et al.*, 2022) จากนั้นทำการทดสอบหาค่า MIC และ MBC ต่อเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 โดยวิธี Broth microdilution จากการทดลองพบว่าสารสกัดหยาบนี้ไม่สามารถยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ได้ในช่วงความเข้มข้น 1 ถึง 1,024 µg/ml จึงสรุปได้เพียงว่าสารสกัดหยาบนี้สามารถยับยั้งเชื้อทั้ง 2 ได้โดยมีค่า MIC มากกว่า 1,024 µg/ml ส่วนค่า MBC ของสารสกัดหยาบนี้ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,024 µg/ml สามารถฆ่าเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 ได้ที่ร้อยละ 99.73 และ 98.20 ตามลำดับ เท่านั้น คือยังพบโคโลนีของเชื้อทั้ง 2 ชนิด (พบโคโลนีของเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 อยู่ในช่วง 2 - 3 โคโลนี ส่วนเชื้อ *S. aureus* ATCC 25923 พบโคโลนีอยู่ในช่วง 15 - 23 โคโลนี) และเนื่องจากการทดลองนี้ใช้เชื้อทดสอบเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 1×10^5 CFU/ml ทำให้คำนวณจำนวนเชื้อที่รอดชีวิตได้เท่ากับร้อยละ 0.27 และ 1.80 ตามลำดับ ซึ่งจำนวนเชื้อที่รอดชีวิตเกินกว่าร้อยละ 0.1 จึงมีค่า MBC มากกว่า 1,024 µg/ml โดยอาจเป็นไปได้ว่าสารออกฤทธิ์ที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัดหยาบนี้มีคุณสมบัติเป็นแบบ Bacteriostatic (Pankey & Sabath, 2004) และยังพบว่าประสิทธิภาพของสารสกัดหยาบนี้ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบทั้ง 2 ได้น้อยกว่ายา Gentamicin เนื่องจากยาที่ความเข้มข้น 0.0625 µg/ml สามารถฆ่าเชื้อทั้ง 2 ชนิดได้ที่ร้อยละ 100 ซึ่ง Gentamicin เป็นยาต้านแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มอะมิโนไกลัยโคไซด์ กลไกการออกฤทธิ์ของยานี้คือการเชื่อมต่อกับไรโบโซม (Ribosome) ที่หน่วยย่อย 30S ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านรหัสของทีอาร์เอ็นเอ (t-RNA) และทำให้แบคทีเรียไม่สามารถสังเคราะห์โปรตีนเพื่อการเจริญเติบโตได้ (Yoshizawa *et al.*, 1998)

หลังจากศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งจากลักษณะโคโลนี ลักษณะเส้นใยและสปอร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA การสร้างและวิเคราะห์ Phylogenetic tree ของยีน 16S rRNA ร่วมกับเชื้อใกล้เคียงที่เป็นเชื้อต้นแบบ (Type strain) ของเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 ทำให้ทราบว่าเชื้อนี้จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* และมีความใกล้เคียงกับเชื้อ *Streptomyces diastaticus* subsp. *ardesiacus* หรือ *Streptomyces ardesiacus* NRRL B-1773 (Type strain) ที่ร้อยละ 99.65 และเมื่อทำการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมพบว่าเชื้อมีลักษณะโคโลนีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่ตรงกันกับเชื้อแอกติโนมัยซีท *Streptomyces ardesiacus* NRRL B-1773 ที่ปรากฏในหนังสือ Bergey's manual of systematic

bacteriology Vol. 5 The Actinobacteria คือลักษณะโคโลนีของเชื้อนี้เมื่ออายุน้อยมีสีเหลือง มีการสร้าง Substrate mycelium เป็นสีเหลืองและขาว และ Aerial mycelium เป็นสีเทา ลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์มีสายสปอร์เรียงตัวแบบ Whorls และมีแขนงแบบ Umbels ที่เรียกว่า Verticillati (Goodfellow *et al.*, 2012) จากการเทียบเคียงชนิดของเชื้อที่ได้พบในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างไปจากงานวิจัยการคัดแยกเชื้อเอนโดไฟติกแบคทีเรียจากเปลือกของผลทุเรียนของ Suhandono *et al.* (2014) ที่แยกเชื้อได้จำนวน 16 ไอโซเลท แบ่งได้เป็นหลายกลุ่มและหนึ่งในนั้นเป็นเชื้อกลุ่มแอกติโนมัยซีท พบจำนวน 3 ไอโซเลท ซึ่งผลจากการศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA พบว่าเชื้อทั้ง 3 ไอโซเลทมีความคล้ายคลึงกับเชื้อ *Gordonia terrae*, *Brachybacterium rhamnsum* และ *Kocuria kristinae* แต่ไม่พบเชื้อสกุล *Streptomyces* เลย

งานวิจัยทั้งหมดนี้สรุปได้ว่าสามารถแยกเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทจากทุเรียนพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดจันทบุรีได้ โดยได้เชื้อแอกติโนมัยซีทจากรากของทุเรียนพันธุ์พวงมณีที่มีความคล้ายกับเชื้อ *Streptomyces ardesiacus* ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *B. cereus* TISTR 2372 และ *S. aureus* ATCC 25923 ได้ และสารสกัดหยาบที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1,024 µg/ml สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ดังนั้นจึงบอกได้ว่าเชื้อเอนโดไฟติกแอกติโนมัยซีทไอโซเลท PM-R01 มีศักยภาพในการยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกบางชนิดได้ และควรนำเชื้อนี้ไปศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราอื่นๆ เพิ่มเติม หรือยับยั้งเชื้อไวรัส ยับยั้งเชื้อกลุ่มปรสิต ยับยั้งเซลล์มะเร็งชนิดต่างๆ หรือยับยั้งเอนไซม์บางชนิด เช่น เอนไซม์ α -glucosidase, α -amylase, Nitric oxide synthase หรือ Cyclooxygenase หรืออาจนำไปศึกษาถึงความเป็นพิษของสารสกัดหยาบกับเซลล์ปกติ และควรทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่มีในสารสกัดหยาบเพื่อให้ทราบถึงชนิดและโครงสร้างทางเคมีของสารออกฤทธิ์ต่างๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณคุณอาจารย์เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาคณะศึกษาศาสตร์วิทยาเขตเฉวงนางสาวนิตยา วรรณจนา และนายวาทีน ลิ้มประยูร ขอขอบคุณเจ้าของสวนทุเรียนที่ให้ความอนุเคราะห์เนื้อเยื่อทุเรียนพันธุ์พื้นเมือง ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรวิ วัชรเจริญกุล ภาควิชาเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสารเคมี ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ปฏิบัติการ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาวรรณ เมตตากุล พิทักษ์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจแก้ไขบทความ

เอกสารอ้างอิง

- Asmah, N., Suniarti, D. F., Margono, A., Mas'ud, Z. A., & Bachtiar, E. W. (2020). Identification of active compounds in ethyl acetate, chloroform, and *N*-hexane extracts from peels of *Citrus aurantifolia* from Maribaya, West Java, Indonesia. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 11(3), 107-112.
- Bérdy, J. (2005). Bioactive microbial metabolites. *The Journal of Antibiotics*, 58(1), 1-26. <https://doi.org/10.1038/ja.2005.1>
- Chun, J., & Goodfellow, M. (1995). A Phylogenetic analysis of the genus *Nocardia* with 16S rRNA gene sequences. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 45(2), 240-245.
- CLSI. (2018). *Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically. CLSI Standard M07* (11th ed.). Clinical and Laboratory Standards Institute.
- Cook, A. E., & Meyers, P. R. (2003). Rapid identification of filamentous actinomycetes to the genus level using genus-specific 16S rRNA gene restriction fragment patterns. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53(6), 1907-1915.
- Darya, M., Abdolrasouli, M. H., Yousefzadi, M., Sajjadi, M. M., Sourinejad, I., & Zarei, M. (2022). Antifouling coating based on biopolymers (PCL/PLA) and bioactive extract from the sea cucumber *Stichopus hermanni*. *AMB Express*, 12, 1-12, Article 24. <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01364-3>
- Goodfellow, M., Kämpfer, P., Busse, H. J., Trujillo, M. E., Suzuki, K., Ludwig, W., & Whitman, W. B. (2012). *Bergey's manual of systematic bacteriology: Volume 5: The Actinobacteria*. Springer New York.
- Gos, F. M. W. R., Savi, D. C., Shaaban, K. A., Thorson, J. S., Aluizio, R., Possiede, Y. M., . . . Glienke, C. (2017). Antibacterial activity of endophytic actinomycetes isolated from the medicinal plant *Vochysia divergens* (Pantanal, Brazil). *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-17, Article 1642. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01642>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Dunlap, P. V., & Clark, D. P. (2009). *Brock biology of microorganisms* (12th ed.). Pearson/Benjamin Cummings.

- Mingma, R., Pathom-aree, W., Trakulnaleamsai, S., Thamchaipenet, A., & Duangmal, K. (2014). Isolation of rhizospheric and roots endophytic actinomycetes from *Leguminosae* plant and their activities to inhibit soybean pathogen, *Xanthomonas campestris* pv. *glycine*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(1), 271-280. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1451-9>
- Otoguro, M., Hayakawa, M., Yamazaki, T., & Imura, Y. (2001). An integrated method for the enrichment and selective isolation of *Actinokineospora* spp. in soil and plant litter. *Journal of Applied Microbiology*, 91(1), 118-130. [https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01372.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01372.x)
- Pankey, G. A., & Sabath, L. D. (2004). Clinical relevance of bacteriostatic versus bactericidal mechanisms of action in the treatment of gram-positive bacterial infections. *Clinical Infectious Diseases*, 38(6), 864-870. <https://doi.org/10.1086/381972>
- Shirling, E. B., & Gottlieb, D. (1966). Methods for characterization of *Streptomyces* species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 16(3), 313-340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1099/00207713-16-3-313>
- Suhandono, S., & Utari, I. B. (2014). Isolation and molecular identification of endophytic bacteria from durian arillus (*Durio zibethinus* Murr.) var. Matahari. *Microbiology Indonesia*, 8(4), 161-169. <https://doi.org/10.5454/mi.8.4.3>
- Taechowisan, T., Chaisaeng, S., & Phutdhawong, W. S. (2017). Antibacterial, antioxidant and anticancer activities of biphenyls from *Streptomyces* sp. BO-07: an endophyte in *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf A. *Food and Agricultural Immunology*, 28(6), 1330-1346. <https://doi.org/10.1080/09540105.2017.1339669>
- Taechowisan, T., Puckdee, W., & Phutdhawong, W. S. (2019). *Streptomyces zerumbet*, a novel species from *Zingiber zerumbet* (L.) Smith and isolation of its bioactive compounds. *Advances in Microbiology*, 9(3), 194-219. <https://doi.org/10.4236/aim.2019.93015>
- Ventola, C. L. (2015). The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. *Pt*, 40(4), 277-283.
- Wink, J., Mohammadipanah, F., & Hamedi, J. (2017). *Biology and biotechnology of actinobacteria*. Springer International Publishing.
- World Health Organization. (2022). *Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS) report 2022*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/item/9789240062702>
- Yoshizawa, S., Fourmy, D., & Puglisi, J. D. (1998). Structural origins of gentamicin antibiotic action. *The EMBO Journal*, 17(22), 6437-6448-6448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/emboj/17.22.6437>

ผลของการทดแทนเนื้อไก่ด้วยผงดักแด้ใหม่ในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวกรอบจากเนื้อไก่

Effects of substituting chicken with silkworm pupae powder in crispy chicken snack products

ตรีทิพย์ ชื่นสันต์¹, นิตยา ภูงาม², ชญาภา บัวน้อย³ และ ณัฐวาลินคณ เศรษฐปราโมทย์^{3*}
Threethip Chuensun¹, Nittaya Phungam², Chayarpar Buano³ and Natwalinkhol Settapramote^{3*}

Received: 30 May 2024 ; Revised: 23 July 2024 ; Accepted: 1 August 2024

บทคัดย่อ

การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมถือเป็นอุตสาหกรรมแมลงที่สำคัญต่อเศรษฐกิจ และผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศไทย (GPD) ทำให้มีดักแด้ใหม่ที่เหลือจากการเก็บไหมในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่ากับดักแด้ใหม่โดยการทดแทนผงดักแด้ใหม่ต่อเนื้อไก่ในผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นกรอบในการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมเนื้อไก่ต่อผงดักแด้ใหม่ของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด้ใหม่ พบว่าอัตราส่วน 60:20 (เนื้อไก่ต่อดักแด้ใหม่) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี พบว่า ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ความกรอบ ปริมาณความชื้น และปริมาณโปรตีนมีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณไขมันเพิ่มมากขึ้น (ร้อยละ 7.31 ± 0.63) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนดักแด้ใหม่มาศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่อบอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 15 นาที เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสี และความกรอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และความชื้นมีค่าลดลง ($p \leq 0.05$) จากการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบสูตรควบคุม และสูตรทดแทนผงดักแด้ใหม่ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ค่าสีของทั้ง 2 สูตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยปริมาณความชื้น ปริมาณกรดไขมัน (A.V.) ค่าเปอร์ออกไซด์ (P.V.) และค่า a_w ของทั้งสองสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น และได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด้ใหม่ โดยคุณภาพจุลินทรีย์เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (เลขที่ มพช. 100/2553)

คำสำคัญ: การทดแทน, ผงดักแด้ใหม่, ไก่แผ่นกรอบ

Abstract

Silkworms are crucial economic insects that significantly contribute to Thailand's national economy and gross domestic product (GDP). The silkworm produces byproducts, including cocoons, which can be utilized to increase farmers' income. To explore this potential, this study aims to replace chicken meat with silkworm pupae powder in crispy chicken snacks. To optimize the ratio of chicken and silkworm pupae powder to crispy chicken products instead of silkworm pupae powder. It was found that the 60:20 ratio (chicken: silkworm pupae powder) provided the optimum formulation. The result showed the control replacing the silkworm pupae powder to crispy chicken products, L^* , a^* , b^* color values, crispness, moisture content and protein content tended to decrease and fat content increased ($7.31 \pm 0.63\%$) with significant difference observed ($p \leq 0.05$). The condition baking temperature and time were studied and it was found that increasing temperature and time influenced color and crispness. While water activity (a_w) and moisture content decreased with a significant difference was observed ($p \leq 0.05$). At 130°C for 15 minutes revealed the highest score ($p \leq 0.05$). Crispy chicken snack was also evaluated for shelf-life by packing in an aluminum-zipped bag and stored at 42°C for 2 weeks. The results revealed that the color was not significantly comparable to the control's ($p > 0.05$).

¹ สาขาการพัฒนากลุ่มผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

² สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์

³ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก พื้นที่ตาก จังหวัดตาก

¹ Department of Agro-Industrial Product Development, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai Province

² Department of Agro-Industry, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus

³ Department of Agro-Industry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Tak Province

* Corresponding author e-mail: natwalin@rmutl.ac.th

However, moisture content, acid value (A.V.), peroxide value (P.V.) and a_w of both formulas tended to increase. The microorganisms detected no excess of the community product standards#100/2553.

Keywords: Replacing, silkworm pupae powder, crispy chicken snacks

บทนำ

ประเทศไทยผลิตผ้าไหมเป็นอันดับที่สี่ของโลก และผลิตเส้นไหมและผลิตภัณฑ์จากไหมที่มีคุณภาพและมีชื่อเสียง ผ้าไหมไทยถือเป็นหนึ่งในเอกลักษณ์ที่แสดงถึงภูมิปัญญาท้องถิ่นและวัฒนธรรมของประเทศ โดยแหล่งผลิตผ้าไหมที่สำคัญอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและกระจายอยู่ทั่วประเทศ จากสถิติในปี 2560 มีพื้นที่ปลูกหม่อน 45,265 ไร่ มีจำนวนเกษตรกรหม่อนไหม 85,097 ราย (Lilavanichakul *et al.*, 2020) ทำให้ดักแด้ไหม (*Bombyx mori* L.) ที่เป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมไหม (Astuti & Komalasari, 2020) มีเป็นจำนวนมาก (Ghosh, *et al.*, 2020) ดักแด้ไหมอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน ไลโคซาน วิตามิน โพลีฟีนอล และสารอาหารอื่นๆ ดักแด้ไหมถูกนำมาใช้เป็นแหล่งสำคัญของโปรตีนและไขมันที่มีคุณภาพสูง โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 67 และ 30.36 ตามลำดับ (Brogan *et al.*, 2021) โปรตีนในดักแด้ไหมประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด และอุดมไปด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นเพียงพอต่อความต้องการกรดอะมิโนของมนุษย์และเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ ไขมันดักแด้ไหมมีกรดอะมิโนไม่อิ่มตัวจำนวนมาก โดยเฉพาะกรดไขมันโอเมก้า 3 (Gwin *et al.*, 2021; Ruocco *et al.*, 2021) เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของดักแด้ไหมให้กับเกษตรกร รวมถึงการนำดักแด้ไหมไปใช้ประโยชน์ที่มากขึ้นกว่าการนำไปเป็นอาหารสัตว์ (Ssemugenze *et al.*, 2021) ดักแด้ไหมมีการบริโภคเป็นอาหารมานานแล้ว โดยจะเป็นการบริโภคตัวดักแด้โดยตรง ต่อมาดักแด้ค่อยๆ ได้รับการตรวจวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อสกัดสารอาหารและสารสำคัญที่มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ต่างๆ และนำไปใช้ในการดัดแปลงอาหารและการพัฒนา (Kamjanapratum *et al.*, 2022) มีการศึกษาวิจัยการใช้ผงดักแด้ไหมเป็นสารเสริมโปรตีนในอาหารเพื่อสุขภาพ พบว่า การเติมผงดักแด้ไหมจะช่วยเพิ่มรสชาติและกลิ่นรสของอาหารในอาหารเพื่อสุขภาพโดยเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ตัวอย่างเช่น ขนมปัง โยเกิร์ต และวัตถุดิบอาหารเพื่อช่วยเพิ่มรสชาติและกลิ่นรส ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้อีกด้วย (Ji *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตาม ดักแด้ไหมยังไม่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคทั่วไป เนื่องจากมีสารก่อภูมิแพ้และมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาความปลอดภัยและการยอมรับของดักแด้ไหมอย่างละเอียดมากขึ้นในการทดสอบ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาจำนวนมากพบว่าสารออกฤทธิ์ใน

ดักแด้ไหมมีหน้าที่ทางเภสัชวิทยาหลายอย่าง เช่น ทำหน้าที่ต้านมะเร็ง สารต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันตับ ด้านเชื้อแบคทีเรียต่อต้านการตายของเซลล์ และปรับภูมิคุ้มกัน นี่เป็นโอกาสที่กว้างขึ้นสำหรับการใช้ดักแด้ไหม ในอนาคตดักแด้ไหมจะได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วสำหรับอุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพและชีวการแพทย์ เพื่อตอบสนองความต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและยาที่ปลอดภัยของมนุษย์ (Sadat *et al.*, 2022) ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการนำดักแด้ไหมมาทำให้อยู่ในรูปแบบของผงแล้วนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารในลำดับต่อไป

ผลิตภัณฑ์ของขบเคี้ยวเป็นที่นิยมบริโภคทั่วโลก การเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตของผู้คนและความต้องการอาหารสะดวกซื้อช่วยเพิ่มตลาดขนมขบเคี้ยวในประเทศไทย รายได้จากกลุ่มอาหารขนมขบเคี้ยวอยู่ที่ประมาณ 137 ล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2562 ตลาดคาดว่าจะเติบโตร้อยละ 1.2 ต่อปี ตามอัตราการเติบโตต่อปีแบบทบต้นระหว่างปี 2562-2566 (Thunyawanichnondh *et al.*, 2020) กระบวนการหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเกี่ยวข้องกับการทอด ปัจจุบันอาหารแปรรูปที่โดยการทอดเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากอาหารจะถูกปรุงสุกอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นการทอดยังเพิ่มคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส เช่น สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทอดเป็นการกระบวนการที่ก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง เช่น อะคริลาไมด์ เนื่องจากในกระบวนการทอดที่อุณหภูมิสูงของขนมที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง ดังนั้นแทนที่อาหารผู้บริโภคเพื่อสุขภาพจึงเป็นที่นิยมมากขึ้น และขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพประเภทใหม่ที่มีไขมันต่ำหรือแคลอรีต่ำจึงถูกพัฒนาแทนขนมขบเคี้ยวแบบทอดที่มีไขมันสูง (Arora *et al.*, 2020) เนื้อไก่เป็นแหล่งโปรตีนจากสัตว์ที่ดีต่อสุขภาพ มีต้นทุนการเลี้ยงที่ต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื้อสัตว์สายพันธุ์อื่นๆ (Dalle Zotte *et al.*, 2020) โดยเนื้อไก่ 150 กรัม มีโปรตีนสูงถึง 30 กรัม ในขณะที่มีไขมันต่ำ (Dal Bosco *et al.*, 2020) แต่อย่างไรก็ตาม ปี 2561 – 2565 ราคาไก่เนื้อที่เกษตรกรขายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 4.35 ต่อปี โดยในปี 2565 ราคาไก่เนื้อที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ยกิโลกรัมละ 43.75 บาท เพิ่มขึ้นจากกิโลกรัมละ 34.87 บาท ของปี 2564 ร้อยละ 25.47 เนื่องจากมีความต้องการบริโภคเนื้อไก่เพิ่มขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำผงดักแด้ไหมที่เป็นแหล่งไขมันที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมาประยุกต์

ให้ในทดแทนเนื้อไก่ในผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบ โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดแทนเนื้อไก่ในผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบ รวมถึงศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบ โดยทำการศึกษาคูณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ และทำการศึกษายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)

วัสดุ อุปกรณ์

การเตรียมผงผักแต่ใหม่

ทำโดยนำผักแต่ใหม่แช่แข็ง (เทศดีไวลด์, สยามแม็คโคร, กรุงเทพฯ) มาล้างทำความสะอาด นำไปอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 18 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นให้ละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 25 Mesh เก็บใส่ถุงอลูมิเนียมลามิเนตแบบซีลลิค (ชนกิจ ถาหมี & พนิดา รัตนปติกร, 2554) นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าสี ปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน

วิธีการทดลอง

ศึกษาอัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงผักแต่ใหม่ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่

ศึกษาสูตร โดยทดแทนผงผักแต่แทนเนื้อไก่สดในสูตร ซึ่งทำการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเนื้อไก่ต่อผงผักแต่ใหม่เป็น 80:0, 60: 20, 40:40 และ 20:60 นำมาผสมกับส่วนผสมและวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นทำการผลิตผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่ โดยนำอกไก่มาปั่นให้ละเอียด แล้วปรุงรสและใส่ผงผักแต่ใหม่ ปั่นต่อให้เข้ากัน ตักใส่ถุงร่อนขนาด 6x9 นิ้ว จำนวน 25 กรัม คลึงเป็นแผ่นบางๆ นำไปนึ่ง 10 นาที ลอกถุงร่อนออกแล้วแบ่งเป็นชิ้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที พักให้เย็น เก็บใส่ถุงอลูมิเนียมลามิเนตแบบซีลลิค (ประกายแก้ว ศุภอักษร และคณะ, 2559) แล้วนำผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ค่าสี ลักษณะทางเนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำอิสระ และปริมาณความชื้น นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมีของการเตรียมผงผักแต่ จำนวน 3 ซ้ำ มาหาค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One - way ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ($p \leq 0.05$)

โปรตีน

ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl (AOAC, 2000) โดยนำตัวอย่างผง 0.5 กรัม ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น ห่อ

ด้วยกระดาษซังสารใส่ลงในหลอดย่อย และเติมกรดกำมะถันเข้มข้น 12 มิลลิลิตร เติมคะตะลิส โดยใช้ CuSO_4 0.35 กรัม และ K_2SO_4 6.25 กรัม จากนั้นทำการย่อยที่อุณหภูมิ 420°C จนสารละลายใสปล่อยให้เย็น แล้วนำสารละลายที่ได้ไปกลั่นด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40% จำนวน 40 มิลลิลิตร เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ให้กลายเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งจะถูกลั่นและดูดซับในสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) ที่มีตัวอินดิเคเตอร์ผสมอยู่ ทำการไตเตรตด้วยกรดเกลือมาตรฐาน (HCl 0.1 N) เพื่อหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด แล้วคำนวณเป็นปริมาณโปรตีน โดยใช้ค่าคงที่ 6.25 โดยโปรตีน (%) เท่ากับ ไนโตรเจน (%) X 6.25

Table 1 Ingredients of Crispy Chicken Snacks

ingredients	Treatment			
	Mixing ratio (g)			
	1 (Control)	2	3	4
Minced chicken breast	80	60	40	20
Silkworm pupae powder	0	20	40	60
Sugar	6	6	6	6
Soy source	2	2	2	2
Spices	1.5	1.5	1.5	1.5
Salt	0.5	0.5	0.5	0.5

Note: Modified by Aedtem *et al.*, (2019).

ไขมัน

ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Soxhlet (Soxhlet system) (AOAC, 2000) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 1 กรัม จากการทำความสะอาด แล้วห่อด้วยกระดาษ ซังสาร ใส่ตัวอย่างลงใน thimble ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำ thimble แล้วด้วยรองรับไขมันที่อบแห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงในเครื่อง (Extraction collection vessel) apparatus เติมนิโตรเลียมอีเทอร์ เป็นตัวสกัดปริมาณ 40 มิลลิลิตร ทำการสกัดโดยตั้งเวลาการสกัด 40 นาที เวลาล้าง 20 นาทีและเวลาการระเหย 20 นาที หลังจากนั้นนำด้วยรองรับไขมันไปอบเพื่อระเหยสารสกัดออกให้หมดที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ทำให้เย็นในโถความชื้นชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักคงที่แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณไขมัน

ค่าสี

ทำการวิเคราะห์ค่าสีโดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบที่ทำการทดแทนผงผักแต่ใหม่ต่อเนื้อไก่มาวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น UltraScan VIS ประเทศไทย โดยค่า L* หรือค่าความสว่างหมายถึง สว่าง (0 = สีดำ, 100 = สีขาว) ค่า a* (+a = สีแดง, -a = สีเขียว) ค่า b* (+b = สีเหลือง, -b

= สีน้ำเงิน) วัดค่าสี 3 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง (Yampung & Thawerattanona, 2022) นำค่าสีที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning index, BI) โดย $BI = 100 \times (x - 0.31)/0.172$, เมื่อ $x = (a^* + 1.75L)/(5.645L + a^* - 3.012b^*)$

เนื้อสัมผัส

วิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยนำตัวอย่างไก่แผ่นอบกรอบมาวางบนแท่นของเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส TA-XT plus (STable Micro Systems, Godalming, UK) โดยโหลดเซลล์ 25 กิโลกรัม จากนั้นตัวอย่างจะถูกกดด้วยแท่งกดทรงกระบอก P/50 ด้วยความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการจดบันทึกค่าความกรอบที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ (Andreani *et al.*, 2020)

ปริมาณน้ำอิสระ (water activity; a_w)

ทำการหาปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง water activity โดยบรรจุตัวอย่างไม่น้อยกว่าครึ่งลงในภาชนะใส่ช่องฝาเครื่องหมუნปุ้มวัดเพื่ออ่านค่ารองจนเครื่องทำงานเสร็จ

ความชื้น

ทำการวิเคราะห์ความชื้นในตัวอย่างด้วยวิธี AOAC (2000) โดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ลงในกระป๋องอลูมิเนียมที่อบและชั่งน้ำหนักไว้แล้ว นำเข้าอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักนำเข้าอบ 1 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 0.1% นำไปคำนวณหาความชื้นที่มีในตัวอย่าง

ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบกรอบของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่แผ่นอบกรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่

นำสูตรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์จากในขั้นตอนศึกษาอัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงผักแต่ใหม่ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่มาศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบกรอบโดยวางแผนการทดลองแบบ 2×3 Factorial ซึ่งมีปัจจัย 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส และเวลา 5, 10 และ 15 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าสี ลักษณะทางเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และความชื้น

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาหาค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบกรอบของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two - way ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ($p \leq 0.05$)

ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่

ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุงออลูมิเนียมลามิเนตแบบซิปล็อค เก็บที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดในประเทศไทยในปี 2564 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2564) เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ทุกสัปดาห์เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ในสัปดาห์ที่ 0, 1 และ 2 โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าสี a_w ปริมาณความชื้น ค่า Acid value (A.V.) ค่า Peroxide value (P.V.) วิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และ ปริมาณเชื้อยีสต์ และรา

ค่า Acid value (A.V.)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 5 กรัม ผสมกับ Methanol 70 มิลลิลิตร ทำการ homogenizer กรองด้วยกระดาษกรอง เติมน้ำ Phenolphthalein (0.1%) 1 มิลลิลิตร ไตรเอทด้วย KOH (0.1M) จนเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู และคำนวณค่า Acid value

ค่า Peroxide value (P.V.)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 5 กรัม ผสม Hexane 50 มิลลิลิตร ทำการ homogenizer กรองด้วยกระดาษกรอง เติมน้ำทำละลายผสม (3:4) 30 มิลลิลิตร คือ Chloroform, Acetic acid เติมน้ำ KI 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นตั้งไว้ที่มีด 5 นาที เติมน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมน้ำแอมโมเนีย 0.5 มิลลิลิตร ไตรเอทด้วย Sodium thiosulfate 0.1 M ให้สีดำนหายไป และคำนวณค่า Peroxide value

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด

โดยใช้เทคนิคการ spread plat บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) บ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 1 วัน

ปริมาณยีสต์ และรา

โดยใช้เทคนิคการ spread plat บนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) บ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 3-5 วัน

การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลการวิเคราะห์กายภาพและเคมี โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลทางสถิติจากการวางแผนการทดลองแบบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (t-test) และเปรียบเทียบอายุการเก็บรักษา (CRD) Completely Randomized Design วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One - way ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผงดักด้ใหม่

Table 2 ผลศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงดักด้ใหม่ โดยนำดักด้ใหม่ผ่านการทำให้แห้งเพื่อใช้ในการทดแทนเนื้อไก่ในผลิตภัณฑ์ไก่กรอบองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของผงดักด้ใหม่ พบว่า ค่าสี L* เท่ากับ 44.44±1.09 ค่าสี a* เท่ากับ 4.65±0.05 ค่าสี b* เท่ากับ 14.29±0.23 ปริมาณน้ำอิสระ เท่ากับ 0.27±0.01 ปริมาณความชื้น เท่ากับร้อยละ 1.75±0.09 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Niveditha *et al.* (2020) ที่มีค่า ปริมาณน้ำอิสระ เท่ากับ 0.34 ปริมาณความชื้น ร้อยละ 1.88 ปริมาณโปรตีน เท่ากับ 68.42±0.80 ปริมาณไขมัน เท่ากับ 29.43±1.78 โดยมีค่าใกล้เคียงกับผงดักด้ของ Brogan *et al.* (2021) ที่พบว่าปริมาณโปรตีนและปริมาณไขมันของผงดักด้เท่ากับร้อยละ 67 และ 30.36 ตามลำดับ

Table 2 Physical and chemical properties of silkworm pupae powder.

Physical and chemical properties	Silkworm pupae powder	
Color	L*	44.44±1.09
	a*	4.65±0.05
	b*	14.29±0.23
a _w	0.27±0.01	
Moisture content (%)	1.75±0.09	
Protein (%)	68.42±0.80	
Fat (%)	29.43±1.78	

Note: Mean ± standard deviation (SD), a_w : Water Activity

ผลการศึกษาอัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงดักด้ใหม่ของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักด้ใหม่

ผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงดักด้ใหม่ ในอัตราส่วน 80:0 (ภาพที่ 1A), 60:20 (Figure 1B), 40:40 (ภาพที่ 1C) และ 60:20 (Figure 1D) (น้ำหนักเนื้อไก่ต่อน้ำหนักผงดักด้ใหม่) จำนวน 4 สูตรตามลำดับ พบว่าสูตรที่ 3 และ 4 มีปริมาณผงดักด้ใหม่ที่ทดแทนเนื้อไก่ในปริมาณสูงจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแห้งมากเกินไปและไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ไม่สามารถการบั่นและรีดให้เป็นแผ่นได้เนื่องจากในเนื้อไก่สดนั้นมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 76.42 (Çapan & Bağdatli, 2021) ในขณะที่ผงดักด้ใหม่นั้นมีเพียงร้อยละ 1.75±0.09 แสดงดัง Figure 1 จึงเลือกนำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงดักด้ใหม่สูตรที่ 1 และ 2 มาทดสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมี ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Physical and chemical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder.

Physical and chemical properties	Treatment 1 (control)	Treatment 2	
Color	L*	47.99±0.16 ^a	39.57±0.88 ^b
	a*	6.67±0.03 ^a	6.00±0.40 ^b
	b*	14.67±0.10 ^a	11.09±0.56 ^b
Crispiness (N)	13.50±0.57 ^a	11.00±0.82 ^b	
a _w ^{NS}	0.41±0.00	0.41±0.00	
Moisture content (%)	2.96±0.12 ^a	2.63±0.08 ^b	
Protein (%)	23.92±0.33 ^a	22.71±0.57 ^b	
Fat (%)	1.75±0.24 ^b	7.31±0.63 ^a	

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same row with different superscript letters were significantly different ($p \leq 0.05$) and ^{NS} not significant.

Table 3 ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักด้ใหม่พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี L* ค่าความสว่าง a* ค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว และ b* ค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน พบว่าเมื่อทดแทนผงดักด้ใหม่ในผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบทำให้ ค่า L*, a* และ b* ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผงดักด้ใหม่ที่ใช้ทดแทนในผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีที่เข้มขึ้น ส่วนค่าของความกรอบ และปริมาณความชื้นก็ลดลงกว่าสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน เนื่องจากผงดักด้ใหม่นั้นมีปริมาณความชื้นต่ำแต่มีไขมันสูง (Mahanta *et al.*, 2023) เนื้อสัตว์ที่มีปริมาณไขมันสูงนั้นจะส่งผลให้มีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไขมันในเนื้อสัตว์นั้นจะรวมตัวกับโปรตีน แบบเมทริกซ์ ซึ่งก่อให้เกิดเป็นผนังกั้นการระเหยของน้ำในอาหาร (Kumar, 2021) นอกจากนั้นการมีไขมันในผลิตภัณฑ์สูงจะทำให้ความกรอบลดลง (Lumanlan *et al.*, 2020) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณไขมันในสูตรที่มีการทดแทนเนื้อไก่ด้วยผงดักด้ใหม่ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณไขมันร้อยละ 7.31±0.63 นอกจากนี้เมื่อทำการทำการศึกษารื่องลักษณะและโภชนาการของผลิตภัณฑ์ จะพบว่าปริมาณโปรตีนมีแนวโน้มลดลง (Karnjanapratum *et al.*, 2022) เนื่องจากในเนื้อไก่มีปริมาณไขมันต่ำ (Kang *et al.*, 2022) ในขณะที่ผงดักด้ใหม่มีปริมาณไขมันที่สูง (Gwin *et al.*, 2021)



Figure 1 Crispy Chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder (before sheet). The figure illustrates four treatments with varying ratios of minced chicken breast to silkworm pupae powder: A; Treatment 1 (80:0), B; Treatment 2 (60:20), C; Treatment 3 (40:40), and D; Treatment 4 (20:60).

ผลการศึกษาคูณภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบกรอบผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด่ใหม่
 นำสูตรที่เหมาะสมที่อัตราส่วน 60:20 ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากในขั้นตอนศึกษาอัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงดักแด่ใหม่ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงดักแด่ใหม่ มาทำการศึกษาคูณภาพทางด้านกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด่ใหม่ที่อบอุณหภูมิและเวลาต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส และเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยผลการศึกษาคูณภาพทางกายภาพและเคมี (Table 4) จาก Table 4 ผลจากการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ พบว่า อิทธิพลหลักด้านอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าสี L* ค่าความสว่าง a* ค่าความเป็นสีแดง b* ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าดัชนีการเกิด

สีน้ำตาล และค่าความกรอบ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอิทธิพลหลักด้านเวลา ได้แก่ เวลา 5, 10 และ 15 นาที พบว่า ค่าสี L* ค่าความสว่าง a* ค่าความเป็นสีแดง b* ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล และค่าความกรอบ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้เวลานานขึ้น

อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับเวลา มีผลต่อค่าสี ค่าสี L* ค่าความสว่าง a* ค่าความเป็นสีแดง b* ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าดัชนีสีน้ำตาล และค่าความกรอบ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบกรอบทำให้ ค่าสี L* ค่าความสว่าง a* ค่าความเป็นสีแดง b* ค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความกรอบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าความกรอบ 19.00 ± 2.65 ค่าสี L* เท่ากับ 48.53 ± 0.20 ค่าสี a* เท่ากับ 7.80 ± 0.04 ค่าสี b* เท่ากับ 16.82 ± 0.14 และเนื่องจากเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลานานขึ้นทำให้ค่าสี L* a* และ b* เพิ่มขึ้น เกิดจากปฏิกิริยา Browning reaction ที่ทำให้อาหารเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเกิดขึ้นได้ระหว่างการแปรรูป คือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) หรือเรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวส์ (reducing sugar) กับกรดแอมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา โดยผลิตผลที่ได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด เป็นสารประกอบหลายชนิด ที่ให้สีน้ำตาลและกลิ่นรสต่างๆ ทั้งที่พึงประสงค์ และไม่พึงประสงค์ (Murata, 2021) ซึ่งสอดคล้องกับค่า Browning Index ที่ตรวจวัดได้

Table 4 Physical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder.

Treatments	L*	Color		Browning Index	Crispiness (N)
		a*	b*		
Temperature (°C)	130	40.70±1.00 ^b	5.30±1.10 ^b	11.81±1.42 ^b	5.11±6.19 ^b
	150	44.48±3.85 ^a	6.28±1.51 ^a	13.75±2.99 ^a	10.56±7.83 ^a
Time (min)	5	39.67±0.57 ^c	4.17±0.05 ^c	10.00±0.46 ^c	1.17±0.41 ^c
	10	43.14±2.26 ^b	6.06±0.65 ^b	13.43±1.07 ^b	6.33±5.57 ^b
	15	44.48±4.97 ^a	7.14±0.73 ^a	14.91±2.10 ^a	16.00±4.34 ^a
130°C	5 min	39.55±0.35 ^d	3.96±0.04 ^e	9.94±0.11 ^e	1.00±0.00 ^c
130°C	10 min	41.17±0.70 ^c	5.47±0.04 ^c	12.48±0.18 ^d	1.33±0.58 ^c
130°C	15 min	41.38±0.18 ^c	6.47±0.02 ^b	13.00±0.08 ^c	11.33±0.94 ^b
150°C	5 min	39.80±0.62 ^d	4.39±0.22 ^d	10.06±0.58 ^e	1.33±0.58 ^c
150°C	10 min	45.11±0.51 ^b	6.65±0.12 ^b	14.38±0.30 ^b	11.33±1.53 ^b
150°C	15 min	48.53±0.20 ^a	7.80±0.04 ^a	16.82±0.14 ^a	19.00±2.65 ^a

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same column with different letter were significantly different ($p \leq 0.05$).

จาก Table 5 ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี อิทธิพลหลักด้านอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า a_w และค่าความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอิทธิพลหลักด้านเวลา ได้แก่ เวลา 5, 10 และ 15 นาที พบว่า ค่า a_w และค่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้เวลาอบนานขึ้น

Table 5 Chemical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder.

Treatments		a_w	Moisture content (%)
Temperature (°C)	130	0.63±0.14 ^a	4.42±2.18 ^a
	150	0.53±0.16 ^b	3.25±2.16 ^b
Time (min)	5	0.77±0.02 ^a	6.60±0.64 ^a
	10	0.52±0.10 ^b	2.87±0.99 ^b
	15	0.44±0.04 ^c	2.05±0.44 ^c
130°C	5 min	0.80±0.01 ^a	7.13±0.10 ^a
130°C	10 min	0.60±0.01 ^c	3.73±0.17 ^c
130°C	15 min	0.48±0.01 ^d	2.41±0.21 ^d
150°C	5 min	0.75±0.01 ^b	6.03±0.06 ^b
150°C	10 min	0.43±0.01 ^e	2.02±0.02 ^e
150°C	15 min	0.41±0.01 ^e	1.69±0.12 ^e

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same column with different letter were significantly different ($p \leq 0.05$).

อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับเวลา พบว่า ค่า a_w และปริมาณความชื้น ลดลงเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นและใช้เวลาอบนานขึ้น เนื่องจากความร้อนระหว่างการอบทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ไปที่ผิวหนังของผลิตภัณฑ์ และนำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในชิ้นผลิตภัณฑ์ ระหว่างการอบยังมีการถ่ายเทมวลออกจากผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผิวหนังของผลิตภัณฑ์ นำในผลิตภัณฑ์จะระเหยออกไป เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ความชื้นและ

ปริมาณน้ำอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (Labuza & Altunakar, 2020) (Table 5)

จากการผลการทดสอบคุณภาพทางเคมีและกายภาพ (Table 4, 5) แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า browning index อยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่ค่า crispiness อยู่ในเกณฑ์ที่สูง ในขณะที่ค่าสีอยู่ในระดับปานกลาง และในส่วนของคุณค่า a_w และความชื้นอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้นจึงทำการเลือกสภาวะการอบนี้ไปใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่ในลำดับถัดไป

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่ 2 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 คือสูตร control และสูตรที่ 2 มาทำการทดสอบอายุการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ แสดงผลดัง Table 6

จาก Table 6 ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี L^* ค่าความสว่าง a^* ค่าความเป็นสีแดง และ b^* ค่าความเป็นสีเหลือง พบว่าในแต่ละสัปดาห์ผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่ทั้งสองสูตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงผักแต่ใหม่สูตรที่ 1 มีค่า L^* a^* และ b^* มากกว่าสูตรที่ 2 ตั้งแต่สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ผ่านเก็บรักษาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยค่าสี L^* a^* และ b^* ค่าสี L^* เท่ากับ 45.08±2.19 และ 37.71±1.38 ค่าสี a^* เท่ากับ 6.77±0.54 และ 6.04±0.44 ค่าสี b^* เท่ากับ 13.90±1.16 และ 10.99±0.51 เนื่องจากในสูตรที่ 2 นั้นมีปริมาณไขมันที่สูงกว่าเมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่เข้มขึ้น (Dey & Nagababu, 2022) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันที่มีในผลิตภัณฑ์ร่วมกับอุณหภูมิที่ทำการเก็บรักษา (Iqdiem *et al.*, 2020)

Table 6 Physical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder during shelf life at 42 °C.

Weeks	Color					
	L*		a*		b*	
	Treatment 1 ^{NS}	Treatment 2 ^{NS}	Treatment 1 ^{NS}	Treatment 2 ^{NS}	Treatment 1 ^{NS}	Treatment 2 ^{NS}
0	45.95±0.56 ^a	40.84±0.11 ^b	6.57±0.07 ^a	6.22±0.23 ^a	14.49±0.13 ^a	11.10±0.58 ^b
1	44.61±0.53 ^a	38.62±0.81 ^b	6.47±0.45 ^b	7.03±1.14 ^a	14.71±1.16 ^a	12.60±1.83 ^b
2	45.08±2.19 ^a	37.71±1.38 ^b	6.77±0.54 ^a	6.04±0.44 ^b	13.90±1.16 ^a	10.99±0.51 ^b

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same row with different letter were significantly different ($p \leq 0.05$) by treatment. ^{NS} in the same column were not significantly different ($p > 0.05$) by period times,

Table 7 Chemical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder during shelf life at 42 °C.

Weeks	a_w		Moisture content (%)	
	Treatment 1 ^{NS}	Treatment 2	Treatment 1	Treatment 2
	0	0.42±0.02 ^a	0.33±0.02 ^{bb}	1.57±0.04 ^{ab}
1	0.44±0.03 ^a	0.38±0.02 ^{ba}	1.59±0.08 ^{ab}	1.03±0.08 ^{bb}
2	0.44±0.01 ^a	0.41±0.03 ^{ba}	2.03±0.10 ^{aA}	1.45±0.07 ^{ba}

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same row with different letter (small letters) were significantly different ($p \leq 0.05$) by treatment. In the same column with different letter (capital letters) were significantly different ($p \leq 0.05$) and ^{NS} in the same column were not significantly different ($p > 0.05$) by period time.

Table 7 เป็นการแสดงผลการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ค่า a_w และปริมาณความชื้น พบว่าค่า a_w และความชื้นนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ที่ไถ่แผ่นทดแทนผงดักแต่ใหม่ ยังไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่กำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน และปริมาณความชื้นอยู่ในระดับที่เชื่อไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (Tapia *et al.*, 2020) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบขนมอบกรอบจากแป้งสาลีที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 300 วัน มีปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษา (Kosegarten *et al.*, 2022) อาหารแห้งที่มีปริมาณน้ำน้อยเป็น monolayer water เมื่อได้รับความชื้นเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนเป็น multilayer adsorption และดูดซับน้ำเข้าไปในรูเล็กๆ ทำให้เกิดการละลายของตัวถูกละลายได้ (Lin *et al.*, 2020) น้ำจะถูกจับให้อยู่ในอาหารโดยวิธีทางกล ทำให้ค่า a_w เพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w

Table 8 Chemical properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder during shelf life at 42 °C.

Weeks	Acid value (mg/KOH/kg sample)		Peroxide value (mg Peroxide/kg sample)	
	Treatment 1	Treatment 2 ^{NS}	Treatment 1	Treatment 2
	0	0.22±0.01 ^{bb}	0.64±0.23 ^a	2.00±0.01 ^{bb}
1	0.37±0.64 ^{ba}	0.71±0.65 ^a	7.33±2.31 ^{ba}	10.00±2.00 ^{aA}
2	0.49±0.13 ^{ba}	0.86±0.06 ^a	8.00±2.00 ^{ba}	10.00±2.00 ^{aA}

Note: Mean ± standard deviation (SD), In the same row with different letter (small letters) were significantly different ($p \leq 0.05$) by treatment. In the same column with different letter (capital letters) were significantly different ($p \leq 0.05$) and ^{NS} in the same column were not significantly different ($p > 0.05$) by period time.

จาก Table 8 Acid value (A.V.) และ ค่า Peroxide value (P.V.) สูตรที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากสูตรที่ 2 มีการทดแทนผงดักแต่ใหม่ในผลิตภัณฑ์จึงมีปริมาณไขมันมากกว่า ทำให้ ค่า Acid value (A.V.) และ ค่า Peroxide value (P.V.) มากกว่า สูตรที่ 1 ที่เป็นสูตรควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตั้งแต่ในสัปดาห์ที่ 0 ของการเก็บรักษา เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ค่า A.V. และ ค่า P.V. เพิ่มขึ้น ทั้ง 2 สูตร ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารในทอมของการเกิด hydrolytic rancidity และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางประสาทสัมผัส ทำให้อาหารมีอายุการเก็บรักษาสั้น และผู้บริโภคไม่ให้การยอมรับ (Othón-Díaz *et al.*, 2023) จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์โดยหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์ รา ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 สูตร ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ได้ผลดัง Table 9

Table 9 Biological properties of crispy chicken snacks with replaced chicken meat by silkworm pupae powder during shelf life at 42 °C.

Weeks	Total Plate Count		Yeast and Mold	
	(CFU/g)			
	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 1	Treatment 2
0	0.36x10 ²	0.31x10 ²	<25	<25
1	0.38x10 ²	0.34x10 ²	<25	<25
2	0.41x10 ²	0.35x10 ²	<25	<25

จาก Table 9 การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด้ใหม่ สูตรที่ควบคุมและสูตรที่ทดแทนเนื้อไก่ด้วยผงดักแด้ใหม่นั้น พบว่า ผลการทดสอบคุณภาพทางจุลินทรีย์ของทั้ง 2 สูตร เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมูแผ่นเลขที่ มผช. 100/2553 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2548) ที่กำหนด โดยจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และ ยีสต์ รา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

สรุปผล

การศึกษาอัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงดักแด้ใหม่ในผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด้ใหม่ พบว่าสูตรที่เหมาะสมในการผลิตนั้นได้แก่สูตรที่ 2 ที่อัตราส่วนเนื้อไก่ต่อผงดักแด้ 60:20 จากนั้นทำการศึกษาคูณภาพทางกายภาพและเคมี พบว่าค่า a_w ค่าสี $L^* a^* b^*$ ความกรอบ ความชื้น โปรตีน และไขมัน มีค่าเท่ากับ ส่วนการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบกรอบผลิตภัณฑ์ไก่แผ่นอบกรอบทำการทดแทนผงดักแด้ใหม่ โดยการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่า อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 15 นาที มีค่า a_w (0.48±0.01) และความชื้น (ร้อยละ 2.41±0.21) อยู่ในระดับที่เชื่อไม่สามารถเจริญเติบโตได้สุดท้ายนี้เมื่อการศึกษายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไก่กรอบทดแทนผงดักแด้ใหม่ โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์นั้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมูแผ่นเลขที่ มผช. 100/2553 ดังนั้นสามารถนำผงดักแด้ใหม่ไปเพื่อใช้ทดแทนหรือประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ นอกจากนี้ ยังเป็นการบรรลุความยั่งยืนในด้านอาหารและความมั่นคงทางเศรษฐกิจอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษา อาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก และ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. (2564). *สรุปสภาวะอากาศทั่วไปในรอบปี พ.ศ. 2564*. สืบค้นจาก <https://www3.tmd.go.th/climate/summaryyearly>

ธนกิจ ถาหมี, และพนิดา รัตนปติกร. (2554). ชนิดของตัวทำลายสภาวะในการสกัดและสมบัติของน้ำมันจากดักแด้ใหม่อีรี่. *วารสารเกษตร*, 27(1), 59-68.

ประกายแก้ว ศุภอักษร, กมลทิพย์ ทองสุข, และรุฮานา วามู. (2559). *ไก่กอบและแผ่นอบกรอบ*. Thai Invention. สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2564, จาก <http://www.thaiinvention.net>

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กองบริหารมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2548). *ปลาแผ่นกรอบ*. กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2566). *สถานการณ์และแนวโน้ม “ไก่เนื้อ” ปี 2566 ไทยและต่างประเทศ*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Aedtem, P., Yamirudeng, K. R., & Sukjuntra, J. (2019). Product development of fish chips from Goldstripe sardinella (*Sardinella gibbosa*). *YRU Journal of Science and Technology*, 4(2), 113–121.

AOAC. (2000). *Official methods of analysis* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.

Andreani, P., de Moraes, J. O., Murta, B. H., Link, J. V., Tribuzi, G., Laurindo, J. B., Paul, S., & Carciofi, B. A. (2020). Spectrum crispness sensory scale correlation with instrumental acoustic high-sampling rate and mechanical analyses. *Food Research International*, 129, 108886. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108886>

Arora, M., Singhal, S., Rasane, P., Singh, J., Kaur, S., Kumar, V., Kumar, A., & Mishra, A. (2020). Snacks and snacking: Impact on health of the consumers and opportunities for its improvement. *Current Nutrition & Food Science*, 16(7), 1028–1043. <https://doi.org/10.2174/1573401316666200130110357>

- Astuti, D. A., & Komalasari, K. (2020). Feed and animal nutrition: Insect as animal feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 465(1), Article 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/465/1/012002>
- Brogan, E. N., Park, Y. L., Matak, K. E., & Jaczynski, J. (2021). Characterization of protein in cricket (*Acheta domestica*), locust (*Locusta migratoria*), and silk worm pupae (*Bombyx mori*) insect powders. *LWT - Food Science and Technology*, 152, Article 112314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112314>
- Çapan, B., & Bağdatlı, A. (2021). Investigation of physicochemical, microbiological and sensorial properties for organic and conventional retail chicken meat. *Food Science and Human Wellness*, 10(2), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.007>
- Dal Bosco, A., Cartoni Mancinelli, A., Vaudo, G., Cavallo, M., Castellini, C., & Mattioli, S. (2022). Indexing of fatty acids in poultry meat for its characterization in healthy human nutrition: A comprehensive application of the scientific literature and new proposals. *Nutrients*, 14(15), 3110. <https://doi.org/10.3390/nu14153110>
- Dalle Zotte, A., Gleeson, E., Franco, D., Cullere, M., & Lorenzo, J. M. (2020). Proximate composition, amino acid profile, and oxidative stability of slow-growing indigenous chickens compared with commercial broiler chickens. *Foods*, 9(5), 546. <https://doi.org/10.3390/foods9050546>
- Dey, S., & Nagababu, B. H. (2022). Applications of food color and bio-preservatives in the food and its effect on the human health. *Food Chemistry Advances*, 1, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100019>
- Gwin, J. A., Carbone, J. W., Rodriguez, N. R., & Pasiakos, S. M. (2021). Physiological limitations of protein foods ounce equivalents and the underappreciated role of essential amino acid density in healthy dietary patterns. *The Journal of Nutrition*, 151(11), 3276–3283. <https://doi.org/10.1093/jn/nxab262>
- Habib, M. A., Chowdhury, A. I., Alam, M. R., & Rahman, T. (2023). Commercially available iodized salts in Noakhali, Bangladesh: Estimation of iodine content, stability, and consumer satisfaction level. *Food Chemistry Advances*, 2, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100294>
- Iqdiyam, B. M., Welt, B. A., Goodrich-Schneider, R., Sims, C. A., Baker, G. L., IV, & Marshall, M. R. (2020). Influence of headspace oxygen on quality and shelf life of extra virgin olive oil during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100433>
- Ji, Y., Xu, L., Xu, Q., Liu, X., Lin, S., Liao, S., Wang, W., & Lan, D. (2022). Synthesis and characterization of epoxidized silkworm pupae oil and its application as polyvinyl chloride plasticizer. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194(9), 4366–4378. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03715-5>
- Kang, K. M., Lee, S. H., & Kim, H. Y. (2022). Effects of using soybean protein emulsion as a meat substitute for chicken breast on physicochemical properties of Vienna sausage. *Food Science of Animal Resources*, 42(1), 73–85. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2021.e63>
- Karnjanapratum, S., Konpetch, P., Sylvia, L., Pinthong, K., & Tokue, S. (2022). Characteristics and nutritional value of silkworm (*Bombyx mori*) pupae fortified chicken bread spread. *Scientific Reports*, 12(1), 1492. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05462-x>
- Kosegarten, C. E., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A., & Mani-López, E. (2022). Wheat-based fried snacks shelf-life prediction using kinetic, probabilistic, and time-to-fail models. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(5), e16548. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16548>
- Kumar, Y. (2021). Development of low-fat/reduced-fat processed meat products using fat replacers and analogues. *Food Reviews International*, 37(3), 296–312.
- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2020). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. In *Water activity in foods: Fundamentals and applications* (pp. 161–205).
- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana Jr., S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water activity in foods: Fundamentals and applications* (pp. 239–271). Wiley-Blackwell.

- Udomsil, N., Jangchud, A., & Jangchud, K. (2020). Development of snack products from silkworm pupae (*Bombyx mori*) and cassava starch. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 41(3), 647–653. <https://doi.org/10.34044/j.kjss.2020.41.3.17>
- Zielińska, E., Baraniak, B., & Karaś, M. (2018). Comparison of functional properties of edible insects and protein preparations thereof. *LWT - Food Science and Technology*, 91, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.055>

ไม้กลายเป็นหินสกุล *Agathoxylon* ในเส้นทางศึกษาธรรมชาติแหล่งซากดึกดำบรรพ์ไม้กลายเป็นหินภูโป อำเภอดำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ ประเทศไทย

Petrified wood of the genus *Agathoxylon* on the nature trail at Phu Por fossil site, Kham Muang District, Kalasin Province, Thailand

ภณิตตา ศรีคำภา¹ และ สุรวเวช สุธีธร^{1,2*}
Phanitada Srikampa¹ and Suravech Suteethorn^{1,2*}

Received: 11 March 2024 ; Revised: 17 May 2024 ; Accepted: 21 December 2024

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของไม้กลายเป็นหินในมหายุคมีโซโซอิก ณ แหล่งซากดึกดำบรรพ์ไม้กลายเป็นหินภูโป อำเภอดำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกชนิดไม้กลายเป็นหินที่พบในเส้นทางศึกษาธรรมชาติ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาแหล่งซากดึกดำบรรพ์ให้กลายเป็นแหล่งอนุรักษ์ซากดึกดำบรรพ์และแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติของอุทยานธรณีกาฬสินธุ์ ตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ศึกษาด้วยวิธีการตัดแผ่นหินบาง เพื่อศึกษากายวิภาคของเนื้อไม้ พบไม้กลายเป็นหิน 1 สกุล คือ *Agathoxylon* พบวงปีชัดเจนและไม่พบวงปี ผันเทรตีดบางและหนา หลุมผนังเซลล์ 1 – 2-seriate เซลล์เรย์ 1 – 2-seriate ปลายเซลล์เรียบ และมี cross-field pits แบบ araucarioid 4 – 12 รอยเว้า การตรวจสอบและวิเคราะห์วงปีของไม้กลายเป็นหินสกุล *Agathoxylon* ช่วยคาดการณ์สภาพอากาศบรรพกาลได้ พบว่าตัวอย่างที่ศึกษามีทั้งที่พบวงปีและไม่พบวงปี บ่งบอกว่าต้นไม้เหล่านี้ผ่านการเผชิญกับสภาพอากาศชื้นโดยมีฤดูแล้งสลับกันในช่วงกลางถึงปลายยุคจูแรสซิก หรือการแปรผันของวงปีอาจเกิดจากการแทนที่ที่ไม่สมบูรณ์ของแร่ธาตุระหว่างที่เกิดกระบวนการกลายเป็นหิน หรือจากผลกระทบอื่นๆ ทางธรณีวิทยา ในขณะที่การค้นพบไม้กลายเป็นหินสกุล *Xenoxylon* จากการศึกษาก่อนหน้านี้สนับสนุนสมมติฐานสภาพอากาศที่เย็นและเปียก การศึกษานี้เป็นส่วนช่วยในการพัฒนาแหล่งซากดึกดำบรรพ์ไม้กลายเป็นหินภูโปให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ ส่งผลดีต่อเศรษฐกิจท้องถิ่น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณค่าการเรียนรู้และอุทยานธรณีกาฬสินธุ์ให้ได้รับการยอมรับในฐานะศูนย์กลางการท่องเที่ยวและการวิจัยระดับชาติและนานาชาติ

คำสำคัญ: *Agathoxylon*, ไม้กลายเป็นหิน, จูแรสซิก, กลุ่มหินโคราช, อุทยานธรณีกาฬสินธุ์

Abstract

A comparative anatomy of the Mesozoic petrified wood was conducted at the Phu Por fossil site in Kham Muang District, Kalasin Province. The objective is to classify the petrified wood species found along the nature trails, contributing to the development of the Kalasin Geopark and conservation tourism or natural tourist attractions focused on Mesozoic-era petrified wood in Thailand. A total of seven samples were studied using the thin section technique, revealing the presence of one genus of petrified wood, *Agathoxylon*. *Agathoxylon* sp. is characterized by the presence or absence of growth rings, thin or thick-walled thacheis, 1 – 2-seriate alternate or opposite in radial walls, 1 – 2-seriate rays, and araucarioid cross-field pits.

Examining and analyzing the growth rings of petrified wood allows for paleoclimate predictions. It was found that the samples had both clear and unclear growth rings, suggesting these trees experienced humid weather with alternating short dry seasons during the middle to late Jurassic. The presence of *Agathoxylon* with growth rings implies a humid climate, while the discovery of *Xenoxylon* from previous studies supports a cool and wet climate hypothesis.

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ศูนย์วิจัยและการศึกษาระบบนิเวศวิทยา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University

² Palaeontological Research and Education Centre, Mahasarakham University

* Corresponding Email: suravech.s@msu.ac.th

Additionally, variations in growth rings may be due to incomplete mineral replacement during petrification or other geological processes. Developing Phu Por fossil site into an eco-tourism destination can significantly benefit the local economy. Furthermore, it will enhance the scientific and educational value of the site, contributing to Kalasin Geopark's recognition as a national and international tourist and research hub.

Keywords: *Agathoxylon*, Petrified wood, Jurassic, Khorat Group, Kalasin Geopark

Introduction

The discoveries of petrified wood in the Khorat Plateau of Thailand have been reported from several provinces in northeastern region. These provinces include Kalasin, Nakhon Ratchasima, Khon Kaen, Roi Et, Yasothon, Udon Thani, Mukdahan, and Sakon Nakhon. The petrified wood found includes *Agathoxylon saravanensis*, *Agathoxylon* sp., *Brachyoxylon boureauii*, *Brachyoxylon orientale*, *Brachyoxylon serrae*, and *Xenoxylon* sp. (Philippe *et al.*, 2004, 2009, 2011; Boonchai *et al.*, 2020).

In Kalasin Geopark, many significant fossil localities have been discovered. One of the richest and complete dinosaur fossil sites is the Phu Kum Khao which located in Sahatsakhan District. The site was developed to the Sirindhorn Museum, the biggest dinosaur museum in Northeastern of Thailand. Developed from the rich fossil site of Phu Kum Khao, this museum houses an extensive collection of dinosaur fossils, making it a key destination for researchers and visitors alike. Recently, one of the most outstanding fossil localities was discovered at Baan Din Chi, Kham Muang District, Kalasin Province. The site named Phu Noi fossil site, has yielded more than 5,000 dinosaur bones, including those of sauropods, theropods and ornithopods, as well as several vertebrate remains such as pterosaurs, crocodiles, turtles, bony fish, and freshwater sharks (Cuny *et al.*, 2014; Tong *et al.*, 2015; Martin *et al.*, 2018; Samathi *et al.* 2019; Deesri *et al.*, 2022; Manitkoon *et al.*, 2023).

Another significant site within Kalasin Geopark is the Phu Por fossil site, located at Ban Kham Somboon, Na Bon Subdistrict, Kham Muang District, Kalasin Province. This site has yielded numerous petrified wood samples, with coordinates marking it at latitude 16° 55' 15.07" and longitude 103° 41' 1.42". The Phu Por fossil site adds to the diversity of paleontological finds in the geopark, showcasing the rich botanical history of the region. The petrified woods found here provide valuable information

about the ancient forests that once covered this area, contributing to a deeper understanding of the region's geological past.

From the Phu Por fossil site, head northeast for about 10 minutes to reach the Phu Noi fossil site (Figure 1). The environment of both sites is characterized as mixed forest, or mixed deciduous forest, scattered in small patches in the northeastern region (Santisuk, 2006). These sparse forests feature trees with alternating tall, medium, and low trunks, interspersed with bamboo. The soil is derived from sedimentary rocks, and most trees shed their leaves in the dry season. However, during the rainy season, the comes alive with full foliage, creating a lush and vibrant landscape. These unique environmental conditions have contributed to the preservation of the region's remarkable fossil record.

Together, these sites form a network of significant paleontological resources within Kalasin Geopark. The Sirindhorn Museum, Phu Por fossil site, and Phu Noi fossil site not only highlight the area's rich fossil heritage but also contribute to the ongoing scientific research and public education efforts, making Kalasin Geopark a vital hub for understanding Thailand's ancient past.

Phu Por fossil site is bedded in the Phu Kradung Formation. The discovery of the petrified wood genus *Xenoxylon* in this location, for the first time in Thailand, indicates that the Phu Kradung Formation dates to the middle to late Jurassic. However, the exact dating of this formation remains debated (Boonchai *et al.*, 2020). The physical characteristics of the rocks and the fossils indicate that the Phu Por fossil site was formed from swamps or rivers with meandering channel river and strong currents in the channel. The paleoclimate was relatively dry (Racey & Goodall, 2009). The Phu Kradung Formation consists of sedimentary rocks including siltstone, greenish-gray sandstone, mudstone, and mixed calcareous conglomerate. The thickness of this rock layer is approximately 1,000

meters. The formation contains mica minerals and calcrete layers interspersed with reddish-gray rocks (Department of Mineral Resources, 2007).

Method

1. Field work

Petrified wood samples were collected from the Phu Por fossil site at a total of seven locations, with in-situ samples chosen for collection, as shown in Table 1. Sample 1 (mean sea level ~240 meters), comes from a point about 220 meters away from the tourist service point (mean sea level ~220 meters), with a petrified wood length of approximately 2.3 meters and a width of approximately 0.8 – 0.9 meters (Figure 1 - 2).

Samples 2 to 7 (mean sea level ~260 meters) come from a point about 420 meters away from the tourist service point. The lengths of the petrified woods for these samples were approximately 6, 5, 6, 5, 4, and 2 meters, respectively (the width could not be measured as it is buried in the rock layer). The petrified wood is arranged in a long row, with seven trees scattered and not aligned in the same direction (Figure 1 - 2).

Tabel 1 Petrified woods used in the study were collected from the Phu Por petrified wood source at various locations.

Fossil No.	Sample No.	Length (m)	Width (m)	Location
PP-19-9	1	~2.3	~0.80–0.9	16°55'18.3"N 103°40'56.6"E
PP-19-1	2	~6	-	16°55'18.0"N 103°41'04.2"E
PP-19-2	3	~5	-	16°55'18.0"N 103°41'04.2"E
PP-19-3	4	~6	-	16°55'18.2"N 103°41'04.0"E
PP-19-4	5	~5	-	16°55'17.9"N 103°41'03.7"E
PP-19-5	6	~4	-	16°55'17.9"N 103°41'03.6"E
PP-19-6	7	~2	-	16°55'17.8"N 103°41'03.4"E

2. Laboratory work

2.1 Sample preparation

Petrified wood samples were prepared for study using the thin section method to analyze the anatomy of the wood. They were then examined under a compound light microscope and a stereo microscope at the Palaeontological Research and Education Center and the Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University.

2.2 Classification of petrified wood

For the anatomical study, the dichotomous key of Philippe and Bamford (2008) was used to identify the scientific names of petrified wood, The anatomical features were compared using the IAWA List of microscopic features for softwood identification. Significant characteristics for identification growth rings, tracheid, helical thickenings in tracheids, axial parenchyma, ray composition, cross-field pitting, ray size, intercellular canals, and mineral inclusions (IAWA Committee, 2004). The description of petrified wood followed Boura *et al.* (2021).

The measurement of the size of the important characteristics used to classify a wand as a stone is based on the following IAWA criteria:

1) Ray cell length is measured in micrometers (µm). The size is measured from a radial section to the tangential, by randomly selecting from an array of not less than 25 cells and then finding the mean (Mean), standard deviation (SD), and range (Range).

2) The length of the ray cell is divided into four sizes: very short (up to 4 cells), medium (5 – 15 cells), long (16 – 30 cells), and very long (more than 30 cells).

3) Tracheids are measured in micrometers and divided into three sizes: short (less than 3000 µm), medium (3000 – 5000 µm), and long (more than 5000 µm) (IAWA Committee, 2004).

Results

1. Systematic paleontology

Seven petrified wood samples used in the study collected from the Phu Por fossil site and belong to the middle to late Jurassic, Phu Kradung Formation. All samples underwent a detailed examination of the anatomy of petrified wood using a light microscope. They can be classified, as shown in Table 2, and the taxonomic

order of petrified wood from the Phu Por fossil site was determined as follows:

Araucariaceae Henkel & W. Hochstetter, 1865

Agathoxylon Hartig, 1848

Agathoxylon sp.

2. Descriptions

Growth ring boundaries are distinct (Figure 3a) or absent (Figure 3b). Tracheids thin-walled, circular to oval in cross-section outline and 14.4 – 37.5 μm (mean 25 μm) in tangential diameter (Table 2).

Tracheids pits in radial walls 1-seriate (Figure 3d), 1-2-seriate (Figure 3e, 3f, 3g) (very rarely 2-seriate, alternate (Figure 3h)), circular to oval in outline and 14.6 - 22.3 μm (mean 18.9 μm) in vertical diameter. Radial pits in chains of contiguous are slightly flattened pits, rarely somewhat distant (Table 2).

Ray is 1-seriate, completely composed of parenchyma, 30 – 183 μm (mean 81.5 μm) high, relatively low with only 1 – 8 cells (mean three cells); rays are oval or elliptical in tangential section, both vertical and

horizontal end walls of ray parenchyma cells are smooth (Figure 3c) (Table 2).

Araucarioid cross-field, pits bordered, with included apertures, more than 5 per cross-field, arranged in mostly two alternate rows, with a tendency for crowding (Figure 3i, 3j) (Table 2).

Helical thickenings on tracheid walls, axial parenchyma, intercellular canals, resin canals and crystals were unobserved.

The described petrified wood can have indistinct or absent growth ring boundaries, whereas *Agathoxylon* typically has well-defined growth rings. The dimensions and wall thickness of tracheids can vary, with the described petrified wood generally exhibiting a narrower range. The described petrified wood features more than five pits per cross-field, often arranged in two rows. Additionally, the rays in the described petrified wood have fewer cells and a smaller overall height compared to *Agathoxylon*. These differences may result from geological changes or the petrification process.



Figure 1 Map showing the location of Phu Por and Phu Noi fossil sites Kham Muang District, Kalasin Province, Thailand. Note: white A = Tourist service point at Phu Por fossil site, B = Sample No.1, C = Sample No. 2 – 7 and D= Phu Noi fossil site – Scale bars: 3000 ft. (Google Earth Pro, 2022)

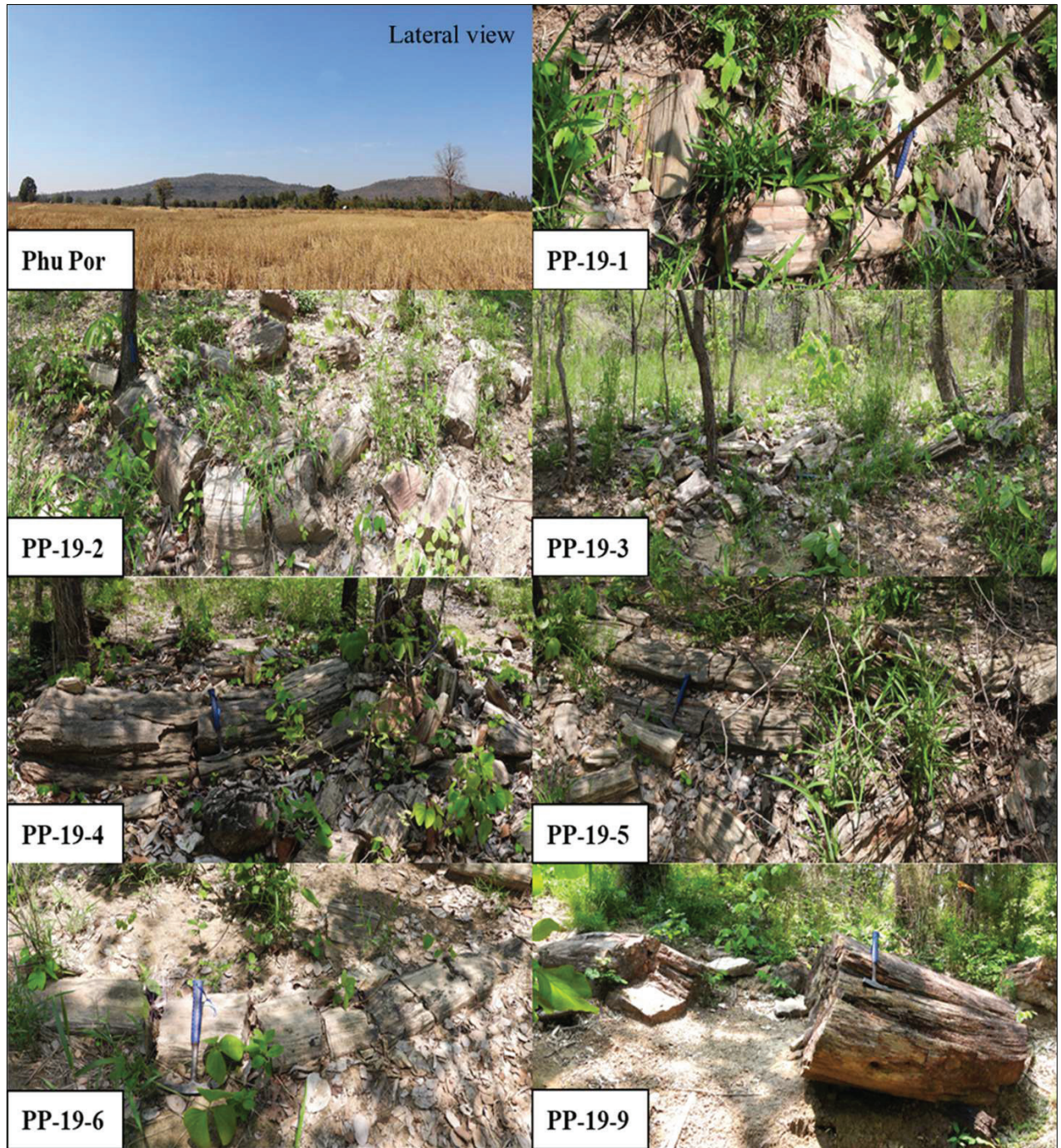


Figure 2 Petrified woods used in the study were collected from the Phu Por fossil site.

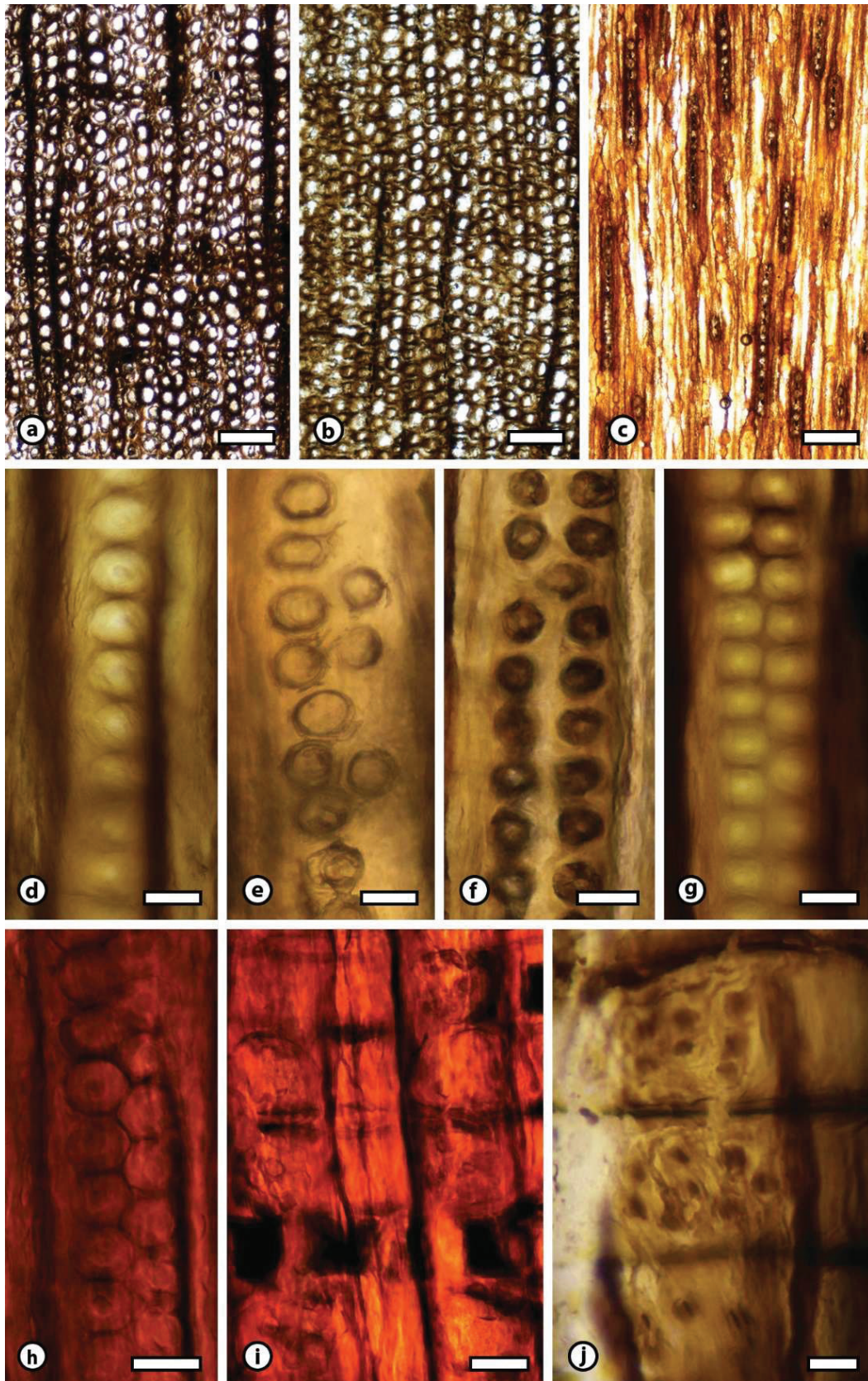


Figure 3 Wood anatomy of *Agathoxylon* sp. (PP-19-1, PP-19-2, PP-19-3, PP-19-5, PP-19-9) from Phu Por fossil site Kalasin Province, Thailand. a: Transverse section showing distinct growth ring. – b: Growth ring absent. – c: Tangential section showing 1-seriate rays. – d: Radial section showing 1-seriate. – e, f: Radial section showing 1 – 2-seriate rays. – g: Radial section showing opposite 2-seriate rays. – h: Radial section showing alternate 2-seriate rays. – i, j: Radial section showing araucarioid cross-field. – Scale bars of 19 = 10 μm ; 13, 14, 15, 16, 17 & 18 = 20 μm ; of 10, 11 & 12 = 200 μm .

Table 2 Comparative anatomy of petrified wood used to study from the Phu Por fossil site. Abbreviation: GR, growth rings; Tg TP, tangential tracheid pitting; Rd TP, radial tracheid pitting; Ax Pa, axial parenchyma; CFP, cross-field pits; R, Resin canals; P, present; A, absent.

Taxa	No.	GR	R	Rd TP	Tg TP	Ray height	CFP (pits)	Ax Pa
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-1	A	A	1-2 seriate, opposite	A	5-12 (x=8)	araucarioid 5-12, 1-3 rows, alternate, opposite	A
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-2	A	A	uniseriate, 1-2-seriate	A	1-15 (x=5)	araucarioid 4- >6, 1-2 rows, alternate	A
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-3	P	A	1-2 seriate, alternate	A	2-11 (x=5)	araucarioid 6-8, 2-4 rows, alternate, opposite	A
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-4	P	A	1-2 seriate, opposite, alternate	A	2-35 (x=10)	araucarioid 4-7, 2 rows, alternate	A
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-5	A	A	1-2 seriate, opposite	A	2-11 (x=7)	araucarioid 4-7(10), 1-3 rows, alternate	A
Gymnosperm (cf. <i>Agathoxylon</i> sp.)	PP-19-6	A	A	1-2 seriate, opposite, alternate	A	-	araucarioid >6, 2 rows, alternate	A
<i>Agathoxylon</i> sp.	PP-19-9	A	A	1-2 seriate, alternate, opposite	A	6-26 (x=11)	araucarioid >6, 2 rows, alternate	A

Discussion

1. *Agathoxylon* distributions

Agathoxylon is a gymnosperm in the family Araucariaceae. First discovered by Hartig in 1848, *Agathoxylon* is the most commonly accepted name (Philippe, 2011). It dates from the Middle Jurassic Period (168-165 million years ago) to the Miocene Epoch (23 – 5.3 million years ago). The current genus closest to *Agathoxylon* is *Agathis*, a pine tree that diverged from the southern hemisphere. The distribution range of *Agathis* covers New Zealand and western Fiji to the Malay Islands and Sumatra. This genus is an example of allopatric speciation, where species evolve in different geographic areas, leading to plants with varying physical characteristics in diverse environments (Whitmore & Page, 1980). It is hypothesized that *Agathis* expanded its distribution range, originating from two central Gondwana, and successfully spread to outcompete wild flowering plants (Whitmore & Page, 1980).

Agathoxylon, a form genus of fossil wood, has a notable presence in Southeast Asia. In the Lower Mekong Basin, which spans parts of Thailand, Laos, and Cambodia, this discovery is instrumental in developing hypotheses about the ancient courses of the Mekong River and understanding the region's paleoenvironment

(Carling *et al.*, 2017). *Agathoxylon* have been discovered in Mesozoic and Quaternary. In Thailand, large petrified trunks of *Agathoxylon* have been found in the northeast and northern regions. During the Mesozoic Era, giant gymnosperm trees, including *Agathoxylon*, were prevalent. These findings highlight the significant role of *Agathoxylon* in the region's paleobotanical record (Benyasuta, 2003; Boonchai, 2008; Boonchai *et al.*, 2020).

The extensive temporal range of *Agathoxylon*, from the Middle Jurassic to the Miocene, highlights its ecological success and resilience. This makes it an important subject of further education for understanding the factors contributing to the longevity and adaptability of plant species over geological time scales (Kloster & Gnaedinger, 2018)

2. Paleoclimate

Examining and analyzing the growth rings of petrified wood allows for paleoclimate predictions. It was found that the petrified wood samples labeled PP-19-3 and PP-19-4 had clear growth rings (Figure 3a) (Table 2). These trees represent wood formed at the end of a short dry season, as evidenced by the fewer tracheid cells growing with thick cell walls. As sugar availability increases later in the season, narrower cells with thick

walls, known as latewood, are produced. This is different from the beginning of the season when tracheid undergo many cell divisions and have thin cell walls. Thus, sugar availability in the cambium affects wood formation during the growing season. Initially, low sugar levels lead to slow wall deposition, resulting in the production of large cells with thin walls, known as earlywood. It may be predicted that each year there was relatively humid weather and alternating periods of short dry seasons (Carteni *et al.*, 2018).

In contrast, petrified woods PP-19-1, PP-19-2, PP-19-5 and PP-19-6 had nebulous or absent growth rings (Figure 3b) (Table 2). The discovery of plants of the same genus in one area, some with growth rings and some without, can be attributed to the varying availability of water sources, which affects tree growth differently.

Another hypothesis is that some of the petrified woods in the present work, where growth rings were not found, grew at the foot of mountains or near water sources, resulting in thin cell walls in the wood. In contrast, some petrified woods with growth rings presumably grew in areas with higher elevations or on mountaintops, where they received less water for growth, resulting in thick cell walls (Carlquist, 2013; Zhou *et al.*, 2022). The domination of *Agathoxylon* with growth rings at Phu Por fossil site may suggest the humid climate with low seasonality during the middle to late Jurassic. Additionally, in the case of petrified woods, this variation may occur due to the incomplete replacement of minerals during the petrification process or other geological processes that affect the visibility of growth rings.

This hypothesis is consistent with the discovery of *Xenoxylon* in the Phu Por fossil site (Boonchai *et al.*, 2020). The presence of *Xenoxylon*, typically indicative of mid- to high-paleolatitudes and cooler or wetter climates (Philippe *et al.*, 2013), in Southeast Asia supports the hypothesis of temporary southward expansions of cooler climate conditions during the Mesozoic. This aligns with similar occurrences in southern China and Vietnam, contributing to the broader understanding of Mesozoic paleoclimate and biogeographical patterns (Boureau, 1950; Vozenin-Serra & Privé-Gill, 1991; Philippe *et al.*,

2009; Oh *et al.*, 2015). *Xenoxylon* distribution is limited to the area of Laurasia, in the high paleo-latitude range of the northern hemisphere. However, during the middle to late Jurassic, the weather in the southern hemisphere was likely getting colder (Oh *et al.*, 2015).

3. Boosting eco-tourism

The petrified wood at Phu Por fossil site is extraordinary, with abundant specimens scattered throughout the mountain area. Studying this wood offers numerous benefits, such as creating job opportunities and boosting the local economy. This can expand career options and distribute income to nearby communities.

Developing Phu Por fossil site into an eco-tourism destination can further promote Kalasin Province as a national geopark. This transformation can attract tourists, researchers, and students, enhancing appreciation for natural history and geological conservation. Historically, while Mesozoic Era petrified wood has been studied in Thailand, there hasn't been a site developed for conservation tourism. Establishing Phu Por as a destination can fill this gap, providing a place for scientific research and education while boosting eco-tourism. This dual focus on preservation and tourism can protect the area's natural heritage and contribute to sustainable economic growth.

Abbreviation

PP: Phu Por fossil site.

Acknowledgments

This research was financially supported by the Faculty of Science, Mahasarakham University (Grant year 2021), and partially supported by the Thailand Science Research and Innovation (TSRI) 2021. We are grateful to Benjavun Ratanasthien for advising on the research. Varavudh Suteethorn, Adun Samathi, and Saithong Sila supported the field trip. Kridsanupong Puntanon, Kongkrapan Chaitongsri, Siripat Kaikaew, Supanut Buttarath, Siripa Pongsengthong, and Ployphan Chittarach provided laboratory assistance with thin section. Special thanks to the Srikampa family, Varitsara Charoensuk, and Dek-chai Phu Peng.

References

- Benyasuta, P. (2003). *Petrified wood of northeastern Thailand and its implication on biodiversity and the ecosystem during the Cenozoic Era* [Ph.D. dissertation, Suranaree University of Technology].
- Boonchai, N. (2008). *The study of the biodiversity and comparative anatomy of petrified wood in the area of the Northeastern Research Institute of Petrified Wood and Mineral Resources, Thailand* [Master's thesis, Suranaree University of Technology].
- Boonchai, N., Suteethorn, S., Sereepasirt, W., & Philippe, M. (2020). *Xenoxylon*, a boreal fossil wood in the Mesozoic redbeds of Southeast Asia: Potential for the stratigraphy of the Khorat group and the palinspatic reconstruction of Southeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 189, Article 104153. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104153>
- Boura, A., Bamford, M., & Philippe, M. (2021). Promoting a standardized description of fossil tracheidoxyls. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 295, Article 104525. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104525>
- Boureau, É. (1950). *Contribution à l'étude paléoxylologique de l'Indochine: I. Présence du Xenoxylon latiporosum Cramer, Gothan, dans le lias du Centre-Annam. II. Présence du Ficoxylon saurinii n. sp. dans le terrain rouge du Cambodge*. Imprimerie française d'outre-mer.
- Carling, P., Boonchai, N., Philippe, M., & Meshkova, L. (2017). A preliminary investigation of fossil wood from Lower Mekong Basin of southeast Asia. *Global Geology*, 20(3), 2–14. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9736.2017.03.01>
- Carlquist, S. (2013). *Comparative wood anatomy: Systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood*. Springer.
- Carteni, F., Deslauriers, A., Rossi, S., Morin, H., De Micco, V., Mazzoleni, S., & Giannino, F. (2018). The physiological mechanisms behind the earlywood-to-latewood transition: A process-based modeling approach. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 991. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00991>
- Cuny, G., Liard, R., Deesri, U., Liard, T., Khamha, S., & Suteethorn, V. (2014). Shark faunas from the Late Jurassic—Early Cretaceous of northeastern Thailand. *Paläontologische Zeitschrift*, 88(3), 309–328. <https://doi.org/10.1007/s12542-013-0203-1>
- Deesri, U., Suteethorn, V., Suteethorn, S., Sila, S., Manitkoon, S., & Cuny, G. (2022, November 7-11). *A disarticulated skeleton of a hybodont shark from the Jurassic of Thailand* [Conference presentation]. The 6th International Palaeontological Congress, Khon Kaen, Thailand.
- Department of Mineral Resources. (2007). *Geology of Thailand* [in Thai]. Ministry of Natural Resources and Environment.
- Google Earth Pro. (2022). *Phu Por fossil site, 16°55'16.66"N, 103°40'48.98"E, elevation 3,000 ft* [Digital map]. Retrieved May 15, 2024, from Google Earth Pro software.
- IAWA Committee. (2004). IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*, 25(1), 1–70. <https://doi.org/10.1163/22941932-02501001>
- Kloster, A. C., & Gnaedinger, S. C. (2018). Coniferous wood of *Agathoxylon* from the La Matilde Formation (Middle Jurassic), Santa Cruz, Argentina. *Journal of Paleontology*, 92(4), 546–567. <https://doi.org/10.1017/jpa.2018.10>
- Manitkoon, S., Deesri, U., Khalloufi, B., Nonsrirach, T., Suteethorn, V., Chanthasit, P., Boonla, W., & Buffetaut, E. (2023). A new basal neornithischian dinosaur from the Phu Kradung Formation (Upper Jurassic) of northeastern Thailand. *Diversity*, 15(7), Article 851. <https://doi.org/10.3390/d15070851>
- Martin, J. E., Suteethorn, S., Lauprasert, K., Tong, H., Buffetaut, E., Liard, R., Salaviale, C., Deesri, U., Suteethorn, V., & Claude, J. (2018). A new freshwater teleosaurid from the Jurassic of northeastern Thailand. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 38(6), Article e1549059. <https://doi.org/10.1080/02724634.2018.1549059>
- Oh, C., Philippe, M., & Kim, K. (2015). *Xenoxylon* synecology and palaeoclimatic implications for the Mesozoic of Eurasia. *Acta Palaeontologica Polonica*, 60(1), 245–256. <https://doi.org/10.4202/app.00040.2013>
- Philippe, M. (2011). How many species of *Araucarioxylon*? *Comptes Rendus Palevol*, 10(2–3), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2011.01.001>
- Philippe, M., & Bamford, M. K. (2008). A key to morphogenera used for Mesozoic conifer-like woods. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 148(2–4), 184–207. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2007.08.003>

- Philippe, M., Daviero-Gomez, V., & Suteethorn, V. (2009). Silhouette and palaeoecology of Mesozoic trees in Thailand. In E. Buffetaut, G. Cuny, V. Suteethorn, & H. Tong (Eds.), *Mesozoic terrestrial ecosystems of Thailand* (Geological Society, London, Special Publications, Vol. 315, pp. 85–96). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/SP315.6>
- Philippe, M., Jiang, H.-R., Kim, K., Oh, C., Gromyko, D., Harland, M., Paik, I. S., & Thévenard, F. (2009). Structure and diversity of the Mesozoic wood genus *Xenoxylon* in Far East Asia: Implications for terrestrial palaeoclimates. *Lethaia*, 42(4), 393–406. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2009.00167.x>
- Philippe, M., Suteethorn, V., & Buffetaut, É. (2011). Révision de *Brachyoxylon rotnaense* Mathiesen, description de *B. serrae* n. sp. et conséquences pour la stratigraphie du Crétacé inférieur d'Asie du Sud-Est [Revision of *Brachyoxylon rotnaense* Mathiesen, description of *B. serrae* n. sp. and consequences for the stratigraphy of the Lower Cretaceous of Southeast Asia]. *Geodiversitas*, 33(1), 25–32. <https://doi.org/10.5252/g2011n1a2>
- Philippe, M., Suteethorn, V., Lutat, P., Buffetaut, E., Cavin, L., Cuny, G., & Barale, G. (2004). Stratigraphical and palaeobiogeographical significance of fossil wood from the Mesozoic Khorat Group of Thailand. *Geological Magazine*, 141(3), 319–328. <https://doi.org/10.1017/S001675680400891X>
- Philippe, M., Thévenard, F., Nosova, N., Kim, K., & Naugolnykh, S. (2013). Systematics of a palaeoecologically significant boreal Mesozoic fossil wood genus, *Xenoxylon* Gothan. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 193, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2013.01.004>
- Racey, A., & Goodall, J. G. (2009). Palynology and stratigraphy of the Mesozoic Khorat Group red bed sequences from Thailand. In E. Buffetaut, G. Cuny, V. Suteethorn, & H. Tong (Eds.), *Mesozoic terrestrial ecosystems of Thailand* (Geological Society, London, Special Publications, Vol. 315, pp. 69–83). Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/SP315.5>
- Samathi, A., Chanthasit, P., & Sander, P. M. (2019). A review of theropod dinosaurs from the Late Jurassic to mid-Cretaceous of Southeast Asia. *Annales de Paléontologie*, 105(3), 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.annpal.2019.07.001>
- Santisuk, T. (2006). *Forests of Thailand* [in Thai]. Forest and Plant Conservation Research Office, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation.
- Tong, H., Naksri, W., Buffetaut, E., Suteethorn, V., Suteethorn, S., Deesri, U., Sila, S., Chanthasit, P., & Claude, J. (2015). A new primitive eucryptodiran turtle from the Upper Jurassic Phu Kradung Formation of the Khorat Plateau, NE Thailand. *Geological Magazine*, 152(1), 166–175. <https://doi.org/10.1017/S001675681400049X>
- Vozenin-Serra, C., & Privé-Gill, C. (1991). Les terrasses alluviales pléistocènes du Mékong (Cambodge). I–Bois silicifiés homoxylés récoltés entre Stung-Treng et Snoul [The Pleistocene alluvial terraces of the Mekong (Cambodia). I–Silicified homoxyloous woods collected between Stung-Treng and Snoul]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 67(1–2), 115–132. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(91\)90029-H](https://doi.org/10.1016/0034-6667(91)90029-H)
- Whitmore, T. C., & Page, C. N. (1980). Evolutionary implications of the distribution and ecology of the tropical conifer *Agathis*. *New Phytologist*, 84(2), 407–416. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04763.x>
- Zhou, Y., Yi, Y., Liu, H., Song, J., Jia, W., & Zhang, S. (2022). Altitudinal trends in climate change result in radial growth variation of *Pinus yunnanensis* at an arid-hot valley of southwest China. *Dendrochronologia*, 71, Article 125914. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125914>

การพัฒนาแบบจำลองรู้จำใบหน้าแมวด้วยการเรียนรู้เชิงลึก

A development of cat face recognition model using deep learning

ภัทรพล ศรีรักษ์¹, จิติมนต์ อังสกุล² และ ธรา อังสกุล^{2*}
Pattarapol Srirak¹, Jitimon Angskun² and Thara Angskun^{2*}

Received: 26 April 2024 ; Revised: 24 June 2024 ; Accepted: 25 July 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันจำนวนสัตว์เลี้ยงในประเทศไทยมีจำนวนสูงมากขึ้นในทุกปี ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเลี้ยงสัตว์คือการที่สัตว์เลี้ยงสูญหายหรือพลัดหลง แมวเป็นหนึ่งในสัตว์เลี้ยงที่มีความนิยม มีอัตราการพลัดหลงแล้วกลับมาเพียงร้อยละ 64 นอกจากนี้อัตราการเสียชีวิตระหว่างสูญหายของแมวยังสูงกว่าสุนัขถึง 2 เท่า การระบุตัวตนแมวสามารถช่วยทำให้ระบุตำแหน่ง หรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับแมวที่พลัดหลงได้ โดยวิธีการระบุตัวตนแมวแบบเดิม เช่น การสักหู การฝังชิป มีข้อจำกัดหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นความรุนแรงต่อสัตว์ ความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ หรือโอกาสที่อุปกรณ์จะสูญหาย บทความนี้นำเสนอวิธีการระบุตัวตนของแมวด้วย ซึ่งเป็นวิธีการไม่รุนแรงและมีต้นทุนต่ำ โดยเป็นการประยุกต์ใช้วิธีการระบุตัวตนด้วยใบหน้าของมนุษย์ โดยได้นำเสนอวิธีการรู้จำใบหน้าแมวโดยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน 1) ขั้นตอนการตรวจจับใบหน้าแมวในภาพ ซึ่งสามารถตรวจจับใบหน้าและตำแหน่งของหู ตา และจมูกของแมวได้ 2) ขั้นตอนการตรวจสอบใบหน้า เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะจากภาพใบหน้าคู่เหมือนของแมวตัวเดียวกันและคู่ต่างของแมวคนละตัว 3) ขั้นตอนการระบุตัวตน เป็นกระบวนการที่จะนำคุณลักษณะที่สกัดได้จากใบหน้าแมวมาใช้เพื่อจัดเรียงหรือเปรียบเทียบข้อมูลชุดอื่นๆ โดยใช้วิธีการ K-NN เพื่อหาจำนวนใบหน้าที่คล้ายคลึงและระบุว่าเป็นแมวตัวใดในฐานข้อมูล ผลการทดลองพบว่า แบบจำลองสำหรับการตรวจจับใบหน้าที่พัฒนาขึ้น มีค่า mAP เท่ากับ 0.995 โดยขั้นตอนการระบุตัวตน 5 อันดับแรก โดยมีความแม่นยำอยู่ที่ 89%

คำสำคัญ: การรู้จำใบหน้าแมว, การระบุตัวตนแมว, การเรียนรู้เชิงลึก

Abstract

Currently, the number of pets in Thailand is increasing every year. Unfortunately, these pets may get lost or lost. Cats are one of the most popular pets. The rate of cats getting lost and returning is only 64 percent. In addition, the death rate of lost cats is twice as high as that of dogs. Cat identification can help to locate them or provide information about lost cats. Traditional cat identification methods, such as ear tattooing and microchipping, have many limitations. Among them are violence against animals, the risk of infection, or the possibility of the device being lost. This article introduces the development of cat face recognition to identify lost cats by their faces. This is a non-violent and low-cost method. It is an application of a method based on human facial identification. The method for recognizing cat faces consists of 3 steps: 1) A step for detecting cat faces in images, which can detect the face and the position of the ears, eyes, and nose. 2) A step to learn features from facial images of identical pairs of the same cat and different pairs of different cats. 3) An identification step is a process in which features extracted from cat faces are used to sort or compare other data sets using the K-NN method to find the number of similar faces and identify which cat is in the database. The experimental results found that the developed model for face detection has a mAP value of 0.995 by the top-5 identification process. The Identification has been shown to be 89% accurate.

Keywords: Cat face recognition, cat identification, deep learning

¹ นักศึกษาปริญญาโท สำนักศาสตร์และศิลปดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² รองศาสตราจารย์ สำนักวิชาศาสตร์และศิลปดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Master's degree student, Institute of Digital Arts and Science, Suranaree University of Technology

² Associate Professor, Institute of Digital Arts and Science, Suranaree University of Technology

* Corresponding author: Thara Angskun; Email: angskun@sut.ac.th

บทนำ

ในประเทศไทย การเลี้ยงสัตว์เลี้ยงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางสังคม เช่น จำนวนคนโสด จำนวนคู่ไม่มีบุตร และจำนวนผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้น การแพร่หลายของสื่อโซเชียลมีเดีย อัตราการเกิดลดลงในขณะที่การเลี้ยงสัตว์เลี้ยงเพิ่มขึ้น สะท้อนให้เห็นแนวโน้มการเลี้ยงสัตว์เลี้ยงเป็นสมาชิกในครอบครัว ปัญหาหลักของการเลี้ยงสัตว์เลี้ยง คือ สัตว์เลี้ยงสูญหายหรือพลัดหลง และการเพิ่มขึ้นของจำนวนสัตว์จรจัด จากสถิติของ Kantar Worldpanel (2022) พบว่าแมวเป็นหนึ่งในสัตว์เลี้ยงยอดนิยมและมีอัตราเติบโตเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย (Figure 1) ซึ่งหากแมวสูญหายหรือพลัดหลงจะพบยาก เนื่องจากความรักอิสระและระมัดระวังตัว

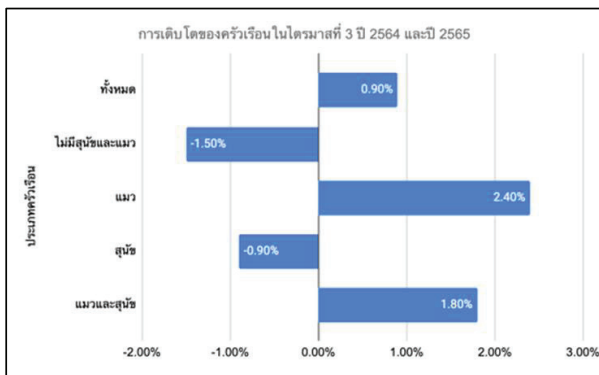


Figure 1 Household growth in the 3rd quarter of 2021 and 2022

วิธีการระบุดัตตสัตว์เลี้ยงมีหลายแบบ ตั้งแต่ชั่วคราวไปจนถึงถาวร เช่น ปลอกคอ, การประทับเย็น, การสักหู และการฝังไมโครชิป นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พยายามใช้ชีวมาตรเพื่อลดค่าใช้จ่ายและความรุนแรงในการระบุดัตต (Kumar & Singh, 2018) ทั้งนี้การศึกษาวิธีการรู้จำใบหน้าแมวยังมีความท้าทายเช่นการจำแนกแมวที่มีลักษณะเฉพาะที่ผิวหน้ามีลวดลายและพื้นที่ผิวน้อย จะทำให้การระบุดัตตได้ยาก เพราะต้องใช้คุณลักษณะบนใบหน้าในการระบุดัตต เช่น ความหนาแน่นของลายบนหน้าผาก ตำแหน่งของตุ่มบนจมูก และเนื้อผิวรอบดวงตา (Lin & Kao, 2018)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการรู้จำใบหน้าแมว ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ในการระบุดัตต โดยการพัฒนาขั้นตอนวิธีและประยุกต์ใช้ระบบการเรียนรู้เครื่องเพื่อระบุดัตตแมวที่หายไป โดยงานวิจัยนี้นำเสนอโมเดลรู้จำใบหน้าแมว 3 ขั้นตอน โดยใช้สถาปัตยกรรม YoLoV5-Face และ Triplet Neural Network ซึ่งมีศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายจากการใช้อุปกรณ์เพื่อระบุดัตตและเพิ่มความแม่นยำในการระบุดัตตแมว เพื่อช่วยให้อัตราการเลี้ยงสัตว์เลี้ยงที่หายไปสามารถกลับคืนสู่เจ้าของได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การระบุดัตตสัตว์เลี้ยง

หลายงานวิจัยได้กล่าวถึงความเป็นเมืองอัจฉริยะหรือการเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุคดิจิทัล (Kumar & Singh, 2018; Moreira *et al.*, 2017) สิ่งที่เกิดขึ้นกับผู้เลี้ยงสัตว์ คือ การพลัดหลงกับสัตว์เลี้ยงหรือหลุดหายไป ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการที่จะระบุดัตตของสัตว์ว่าจะใช้วิธีการใด จากการศึกษางานวิจัยด้านวิธีการระบุดัตตสัตว์เลี้ยงในปัจจุบันพบว่าวิธีการระบุดัตตสัตว์แบบเดิมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การระบุดัตตแบบถาวร การระบุดัตตแบบกึ่งถาวร และการระบุดัตตแบบชั่วคราว ซึ่งตัวอย่างของการระบุดัตตแต่ละแบบได้แก่ การระบุดัตตแบบถาวร เช่น การสักใบหู การฝังไมโครชิป การเจาะหูหรือการตัดหู การประทับรอย การประทับเย็น ตัวอย่างการระบุดัตตแบบกึ่งถาวร เช่น การติดป้ายที่หู การใส่ปลอกคอ ซึ่งจะพบว่าวิธีการแบบถาวรและกึ่งถาวรนั้นเป็นวิธีการที่รุนแรงกับร่างกายของสัตว์ ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่มีประสบการณ์ และมีความเสี่ยงในการติดเชื้ขึ้นกับสัตว์ ตัวอย่างการระบุดัตตแบบชั่วคราว เช่น การย้อมสี การแขวนป้าย RFID วิธีการแบบชั่วคราวจะมีการปฏิสัมพันธ์กับร่างกายของสัตว์น้อยกว่าเนื่องจากการสวมใส่อุปกรณ์ทำให้ไม่มีการใช้ความรุนแรง แต่ก็เป็นวิธีที่สามารถสลาย หรือสูญหายได้ ปัญหาเรื่องการระบุดัตตจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายในงานวิจัยด้านนี้ ซึ่งมีงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้ ชีวมาตรสัตว์ โดยแบ่งออกเป็น 4 วิธีดังนี้

การระบุดัตตสัตว์ด้วยใบหน้า

กระบวนการระบุดัตตสัตว์เลี้ยงด้วยใบหน้าจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ 1) การระบุใบหน้า 2) การระบุคุณลักษณะ 3) การระบุดัตต ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดดังนี้ ขั้นตอนการระบุใบหน้า เป็นขั้นตอนแรกเริ่มของการรู้จำใบหน้า เพื่อที่จะค้นหาใบหน้าของสิ่งที่สนใจก่อนจะนำมาสกัดคุณลักษณะ ซึ่งการระบุใบหน้าจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ Feature-Based และ Deep Learning-Based ประเภท Feature-Based อาทิ งานของมอเรราห์และคณะ (Moreira *et al.*, 2017) ได้ใช้ EigenFace และ Fisher Face ในการตรวจจับใบหน้าสุนัข งานของหลวนและคณะ (Ruan *et al.*, 2014) เลือกใช้ Deformable Parts Model (DPM) ซึ่ง

มีจุดเด่นคือความรวดเร็วและเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อจำกัด เรื่องแบบจำลองสำหรับการสกัดคุณลักษณะไม่มีความยืดหยุ่น ทำให้ใช้งานต่อได้ยาก ต้องใช้มนุษย์เป็นผู้กำหนดคุณลักษณะด้วยตัวเองทำให้ต้องใช้ทรัพยากรเช่นผู้ที่มีความรู้ในการกำหนดคุณลักษณะและเวลาที่ใช้ในการกำหนดคุณลักษณะ ทั้งนี้ในระยะหลัง วิธีการเรียนรู้ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Montenegro *et al.*, 2022) นั้นได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากปัจจัยทางด้านฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและซอฟต์แวร์ที่มีการพัฒนาเครื่องมือใหม่ๆ ให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น งานวิจัยของยูนและคณะ (Yoon *et al.*, 2021) ได้เลือกใช้ ResNet-like ลินและเคา (Lin & Kao, 2018) ได้ใช้ Faster R-CNN แบบสองขั้นตอนในการค้นหาบริเวณที่น่าสนใจและใบหน้า อตัม ไคลน์ (Klein, 2019) ได้ใช้ YOLOv3 ในการตรวจจับใบหน้า ซึ่งวิธีการเรียนรู้เชิงลึก มีข้อดี คือ ความสามารถในการให้คอมพิวเตอร์เป็นผู้ค้นหาคุณลักษณะข้อมูลเองได้ มีความยืดหยุ่นและสะดวกสามารถนำไปใช้งานต่อในงานใกล้เคียงได้ แต่ก็ต้องใช้พลังในการประมวลผลค่อนข้างสูง ซึ่งโดยสรุปแล้วแต่ละวิธีนั้นก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ YOLOv5-Face ที่พัฒนาโดยซีและคณะ (Qi *et al.*, 2022) เนื่องจากเป็นวิธีการการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งมีความสามารถในการตรวจจับใบหน้าได้ในหลากหลายสภาพแวดล้อม มีการทำงานที่รวดเร็วและสามารถระบุจุดสำคัญบนใบหน้าได้

ขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะ เป็นขั้นตอนที่คอมพิวเตอร์จะเรียนรู้ลักษณะของภาพ เช่นเดียวกับขั้นตอนระบุใบหน้าที่การสกัดคุณลักษณะสามารถทำได้ 2 วิธี คือ Feature-Based และ Deep Learning-Based ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมแต่ละงานวิจัย จะมีการเลือกใช้วิธีการที่แตกต่างกัน อาทิ กลุ่มงานวิจัยที่เลือกใช้วิธีการแบบ Feature-Based ได้แก่ कुमारและซิง (Kumar & Singh, 2018) ได้นำเสนอวิธีการสกัดคุณลักษณะแบบ Fisher Linear Projection and Preservation (FLPP) ที่เป็นกระบวนการสกัดคุณลักษณะของใบหน้าสุนัขพร้อมกระจายชุดข้อมูลระหว่างคลาส งานวิจัยของ ลินและเคา (Lin & Kao, 2018) เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในการระบุตัวตน โดยเลือกใช้ EigenFace เพื่อสกัดคุณลักษณะบนใบหน้าแมวจากชิ้นส่วนใบหน้า กลุ่มงานวิจัยที่เลือกใช้วิธีการแบบ Deep Learning Based ได้แก่ ไลและคณะ (Lai *et al.*, 2019) ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันสถาปัตยกรรม Faster R-CNN ในการเรียนรู้คุณลักษณะของภาพโดยนำกระบวนการแบบ Coarse-to-fine โดยใช้แบบจำลองสองตัว แบบจำลองตัวแรกเพื่อทำนายพื้นที่ของสุนัขและ แบบจำลองตัวที่สองเพื่อสกัดคุณลักษณะของใบหน้าเพื่อระบุตัวตน งานวิจัยของมูเกต์และคณะ (Mougeot *et al.*, 2019) ไม่มีขั้นตอนของการระบุใบหน้า แต่ใช้การสกัดคุณลักษณะจาก

ภาพใบหน้าสุนัขที่ผ่านการประมวลผลมาแล้วด้วยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแฝดสามคู่กับฟังก์ชัน Triplet Loss เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะของใบหน้า เช่นเดียวกับงานของ ไคลน์ (Klein, 2019) และยูนและคณะ (Yoon *et al.*, 2021) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการแบบ Deep Learning Based โดยเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแฝดสามคู่กับฟังก์ชัน Triplet Loss มาใช้ในการพัฒนา เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาวิธีการอย่างต่อเนื่อง จึงง่ายต่อการพัฒนาและต่อยอดทั้งในปัจจุบันและอนาคต

ขั้นตอนการระบุตัวตนเป็นขั้นตอนที่จะนำข้อมูลที่ถูกรับรู้คุณลักษณะมารวบรวมไว้ เพื่อเปรียบเทียบกับภาพใบหน้าเป้าหมายที่ถูกนำเข้ามาเพื่อระบุตัวตน ซึ่งกระบวนการที่นิยมนั้นมีหลากหลายเทคนิคดังนี้ เทคนิค Support Vector Machine (SVM) ถูกใช้ในงานวิจัยของ ลินและเคา (Lin & Kao, 2018) เพื่อเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะโดยใช้การลากผ่านของค่าข้อมูล เทคนิค K-Nearest Neighbor (K-NN) ถูกใช้ในงานของยูนและคณะ ไคลน์ และมูเกต์และคณะ (Yoon *et al.*, 2021; Klein, 2019; Mougeot *et al.*, 2019) โดยใช้การเปรียบเทียบค่าจากข้อมูลในตำแหน่งโดยรอบ ซึ่งจุดเด่นของเทคนิคนี้คือ ความสามารถในการปรับค่าข้อมูลนำเข้า และจำนวนเพื่อนบ้านใกล้เคียงได้ ทำให้มักถูกนำมาวัดผลการทำนาย 1 อันดับจนถึง 5 อันดับได้

การศึกษางานวิจัยด้านวิธีการระบุตัวตนสัตว์เลี้ยงในแง่ผลภาพรวมของวิธีการมีรายละเอียดดังนี้ เฉินและคณะ (Chen *et al.*, 2016) ได้นำเสนอวิธีการระบุตัวตนแมวโดยใช้ลักษณะของจมูก เนื่องจากลักษณะจมูกของสัตว์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเหมือนลายนิ้วของคน เช่นเดียวกับปศุสัตว์ โดยได้มีการทดลองใช้รูปจมูกแมวกว่า 700 รูป จากแมว 70 ตัว เพื่อระบุตัวตนของแมว แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวไม่ได้ระบุผลการทดลองเชิงปริมาณอย่างชัดเจน หลิวและคณะ (Liu *et al.*, 2012) ได้ใช้การตรวจจับใบหน้าสุนัขเพื่อคัดแยกสายพันธุ์โดยใช้สไลดิงวินโดวส์ (Sliding window) เพื่อระบุจมูกและตาเพื่ออ้างอิงไปยังจุดที่เป็นหูและส่วนประกอบที่เหลือ จากนั้นจึงวิเคราะห์ฮิสโตแกรม (Histogram) และใช้ เอสไอเอฟที (SIFT: Scale Invariant Feature Transform) ในการวิเคราะห์เพื่อหาจุดเด่นของรูปภาพที่ได้รับเข้ามา ซึ่งมีความแม่นยำ 67% จากสุนัข 133 สายพันธุ์ จำนวน 8,351 รูปภาพงานวิจัยของ ลินและเคา (Lin & Kao, 2018) พัฒนาระบบรู้จำใบหน้าแมวโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกแบบฟาสต์เตอร์อาร์-ซีเอ็นเอ็น (Faster R-CNN) โดยศึกษาจากรูปภาพของแมวจำนวน 150 ตัว ซึ่งในการพัฒนา ผู้วิจัยได้แบ่งแบบจำลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนสำหรับการตรวจจับใบหน้า และส่วนสำหรับการระบุส่วนประกอบบนใบหน้า ได้แก่ หน้าผาก ตา จมูก และปาก จากนั้นจึงใช้เอสวีเอ็ม (SVM) ในการวิเคราะห์

ลักษณะของส่วนประกอบเพื่อคัดแยกแมวแต่ละตัว ซึ่งในการทดลองสามารถระบุตัวตน โดยมีความแม่นยำภาพ 94.1% แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านสภาพแสงและแมวบางลักษณะ

เช่น แมวดำ ที่ไม่สามารถแยกคุณลักษณะเฉพาะออกมาเพื่อคัดแยกได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปแสดงดัง Table 1

Table 1 Research process comparison

Author	Method ¹	Face Detection Method	Face Detection Feature			Feature Extraction Method	Identification Method
			Multiple Face	Face Landmark	Face Alignment		
Adam Klein	D	YOLO	✓			Triplet Neural Network+GOR+Triplet Mining	KNN
Lin, Kao	H	Faster R-CNN	✓	✓		Eigen Face	SVM
Lai <i>et al.</i>	D	Faster R-CNN	✓	✓	✓	CNN	CNN(Prediction)
Mougeot <i>et al.</i>	D					Triplet Neural Network +Triplet Mining	RANSAC
Moreira <i>et al.</i>	H					Eigen Face+LBP +CNN	SVM
Kumar, Singh	M					LBP	SVM+LDA
Chen <i>et al.</i>	M					HOG	SVM
Ruan <i>et al.</i>	M	DPM		✓		HOG	
This Research	D	YOLOv5-Face	✓	✓	✓	Triplet Neural Network+GOR+Triplet Mining	KNN+FAISS

1 D = Deep Learning (การเรียนรู้เชิงลึก),
 H = Hybrid (วิธีการแบบผสมผสาน),
 M = Manual (วิธีการสกัดคุณลักษณะด้วยมือ)

แบบจำลองการรู้จำใบหน้าแมว

สถาปัตยกรรมของแบบจำลอง

การออกแบบระบบรู้จำใบหน้าสัตว์เลี้ยงด้วยการเรียนรู้เชิงลึกประกอบด้วยสามขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การตรวจจับใบหน้าแมวภายในภาพ ซึ่งมีความท้าทายจากสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย อาทิ ระยะห่าง แสง และเงา 2) การเปรียบเทียบใบหน้า ซึ่งใช้กระบวนการสกัดคุณลักษณะและฝึกฝนแบบจำลองเพื่อแยกคุณลักษณะของแมวแต่ละตัว และ 3) การระบุตัวตน, โดยการสร้างชุดเวกเตอร์ของข้อมูลและใช้พื้นที่การฝังตัวข้อมูล (Embedding Space) เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในฐานข้อมูลโดยใช้วิธีการ KNN เพื่อระบุตัวตนของแมว (Figure 2)

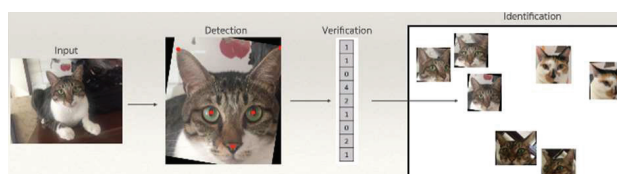


Figure 2 Architecture of the cat face recognition model

2. ชุดข้อมูลนำเข้า

ชุดข้อมูลนำเข้าในงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลจากแคทเกิล (Kaggle) ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลใบหน้าของแมว 9,993 รูปภาพ โดยแบ่งเป็น 7,284 ภาพสำหรับการฝึกฝนและ 2,709 ภาพสำหรับการทดสอบ (Figure 3) ชุดข้อมูลดังกล่าว เป็นชุดข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการฝึกแบบจำลองให้สามารถตรวจจับใบหน้าของแมวได้ ชุดข้อมูลชุดที่สองเป็นชุดข้อมูลใบหน้าของแมวจากในงานวิจัยหลินและเคา (Lin & Kao, 2018) (Figure 4) ซึ่งได้รวบรวมใบหน้าแมว 519 ตัวจากสถานรับเลี้ยงสัตว์ ซึ่งแมวแต่ละตัวจะมีภาพไม่ต่ำกว่า 10 ภาพมุมที่แตกต่าง โดยจากข้อมูลดิบจำนวน 13,536 ภาพ เมื่อคัดแยกรูปภาพที่มีความละเอียดต่ำ มีภาพน้อยกว่า 5 รูป ภาพซ้ำ ภาพเบลอ และไม่สมบูรณ์อื่น ๆ มีภาพแมวคงเหลือจำนวน 396 ตัว โดยแบ่งเป็นชุดสำหรับฝึกฝนจำนวน 328 ตัว 8,125 ภาพ ชุดสำหรับการตรวจสอบ 68 ตัว 2,258 ภาพ เพื่อนำมาใช้ฝึกและทดสอบแบบจำลอง เพื่อให้สามารถรู้จำใบหน้าแมวแต่ละตัวได้ และใช้ชุดข้อมูลดังกล่าวสำหรับการทดสอบความแม่นยำในการทำนายผล



Figure 3 Example of cat image in dataset from Kaggle.

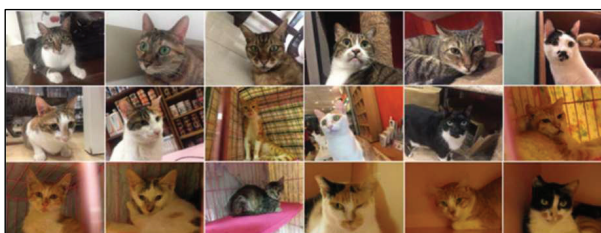


Figure 4 Examples of cat faces presented in Lin and Kou's research

กระบวนการตรวจสอบใบหน้า

กระบวนการตรวจสอบใบหน้าในงานวิจัยนี้ ได้ทดลองใช้ pre-trained โมเดล โดยวิธีการแรกใช้ Haar Cascade Classifier และ FHOG-based SVM ซึ่งพบว่าผลลัพธ์การตรวจจับใบหน้าแมวของทั้งสองวิธีนั้นมีความผิดพลาดสูง จึงได้เปลี่ยนเป็นวิธีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยใช้ CNN ซึ่งมีความแม่นยำกว่าสองวิธีการแรก แต่มีข้อจำกัดคือใช้ระยะเวลาประมวลผลนาน สามารถค้นหาได้เพียง 1 ใบหน้าต่อภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนโดยใช้เทคนิค Faster R-CNN ซึ่งเป็นเทคนิคเดียวกันกับงานวิจัยของ Lin และ Kou ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องสถาปัตยกรรมถูกออกแบบมาเพื่อให้ระบุ Bounding Box ของใบหน้าเท่านั้น หากต้องการระบุจุดสำคัญของใบหน้าจะต้องพัฒนาแบบจำลองใหม่สำหรับการประมวลผลซึ่งจะต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการประมวลผลเพิ่มขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สถาปัตยกรรมตระกูล YOLO ที่มีจุดเด่นในเรื่องความเร็วและความแม่นยำเช่นเดียวกับ Faster R-CNN โดยแบบจำลองได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการค้นหาบริเวณที่น่าจะมีวัตถุและสร้าง Bounding Box ขึ้นมารอบวัตถุเท่านั้น โดยงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ YOLOv5-Face ในเวอร์ชันย่อยที่ได้รับการปรับปรุงให้สามารถใช้การระบุจุดสำคัญของใบหน้าได้ (Figure 5)



Figure 5 Sample image of the results of cat face landmark and alignment

กระบวนการตรวจสอบใบหน้า

แบบจำลองที่ใช้ในขั้นตอนตรวจสอบใบหน้าแมวนี้ ได้พัฒนาในรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแฝดสาม (Triplet Neural Network) ซึ่งเป็นแบบจำลองสามารถรับข้อมูลนำเข้าทั้งหมด 3 ชุด และมีการแชร์น้ำหนัก (Weight) กันภายในแบบจำลอง เพื่อให้ภาพเดียวกันได้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน (Figure 6)

งานวิจัยนี้ใช้การถ่ายโอนความรู้ (Transfer Learning) เข้ามาช่วยเพื่อให้ประหยัดเวลาและทรัพยากรในการพัฒนา โดยแบบจำลองที่เลือกใช้จะเป็นแบบจำลอง EfficientNetV2S ซึ่งโมเดลที่ถูกฝึกฝนไว้ล่วงหน้า (Pre-trained Model) โดยจะไม่ใช้เลเยอร์ชั้นสุดท้าย แต่จะใช้เพียงเลเยอร์รองสุดท้ายเพราะต้องการผลลัพธ์ข้อมูลในลักษณะของเวกเตอร์ โดยจะเชื่อมเลเยอร์ต่อท้ายเพื่อปรับผลลัพธ์ให้เป็นเวกเตอร์ขนาด 128 จากนั้นผลลัพธ์จะถูกใช้ฟังก์ชัน L2 เพื่อ Normalize ข้อมูล

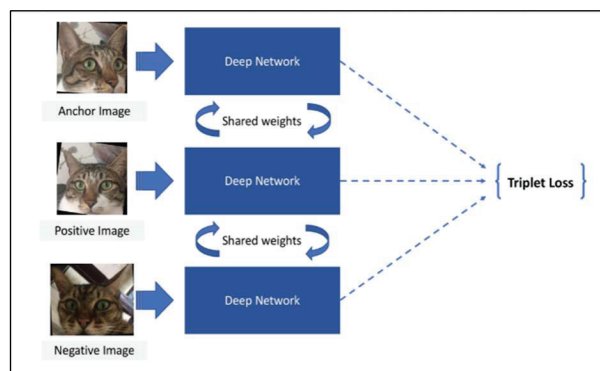


Figure 6 Example image of cat face training with Triplet Network

และเมื่อได้ผลลัพธ์แบบเวกเตอร์แล้ว ผลลัพธ์ดังกล่าวก็จะถูกนำไปใช้ในฟังก์ชัน Triplet Loss เพื่อทำให้ภาพใบหน้าของแมวตัวเดียวกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน และแมวที่แตกต่างกันจะกระจายตัวจากกัน (Figure 7)

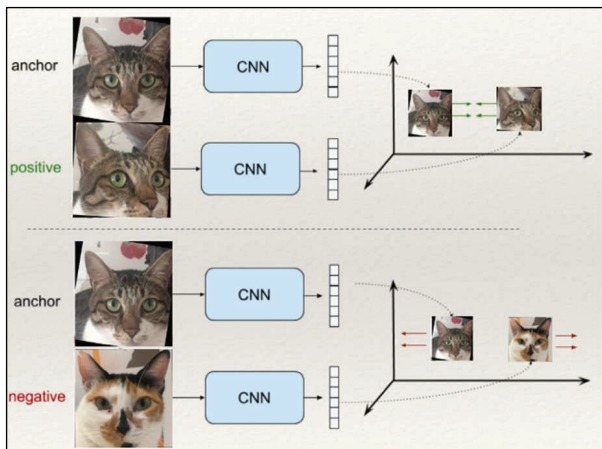


Figure 7 Process of feature extraction and cat face identification

อย่างไรก็ตามการใช้ Triplet Neural Network และ Triplet Loss ยังไม่สามารถสร้างการกระจายตัวของข้อมูลได้ดีเพียงพอ เพราะบางครั้งลักษณะใบหน้าแมวในคลาสอื่น ก็อาจจะมีค่าระยะทางที่ใกล้กว่าใบหน้าแมวในคลาสเป้าหมาย งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีการในการช่วยเลือกข้อมูลและการปรับค่า Loss ของข้อมูลเพื่อให้แบบจำลองเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมือนและแตกต่างกันมากขึ้นโดยกระบวนการ Hard Batch ที่ถูกนำเสนอโดย เฮอร์แมนและคณะ (Hermans *et al.*, 2012) คือการทำ Triplet Mining ซึ่งจะช่วยให้แบบจำลองได้เรียนรู้ภาพของคลาสที่มีความใกล้เคียงกัน โดยเมื่อนำ Triplet Mining แบบ Hard Batch มาใช้ในกระบวนการคัดเลือกรูปภาพแต่ละรอบ โดยสุ่มคลาสจากจำนวน $BatchSize/4$ คลาส จากนั้นหนึ่งคลาสจากที่สุ่มมาจะถูกเลือกเพื่อเป็นภาพ Anchor และภาพ Positive คลาสที่เหลือจะถือว่าเป็นภาพ Negative ในการเลือกภาพ จะคำนวณระยะทางด้วยวิธีการ Euclidian Distance ระหว่างภาพ Anchor กับทุกภาพที่เหลือในคลาส และจะเลือกภาพที่มีระยะทางสูงสุด (Farthest Positive) เพื่อใช้หาภาพแมวตัวเดียวกันที่มีความแตกต่างกันมากที่สุด จากนั้นคลาสที่เหลือที่เป็น Negative จะถูกสุ่มเลือกมาและหาภาพที่มีความคล้ายกับภาพ Anchor ที่สุดโดยการคำนวณหาระยะทางใกล้ที่สุด (Nearest Negative) จากนั้นค่าจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณและปรับค่า Loss ทำให้ข้อมูลมีการกระจายตัวที่ดียิ่งขึ้น (Figure 8)



Figure 8 Example of comparison between Hard Triplet

นอกจากนี้ภายใน Triplet Loss Function ได้มีการนำ Generalized Outlier Rejection (GOR) ที่เสนอโดยจางและคณะ (Zhang *et al.*, 2017) มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดย GOR จะทำหน้าที่เป็น Regularization ภายใน Triplet Loss Function ซึ่งปกติจะใช้ในการลดค่า Loss ที่เกิดจากการเรียนรู้ของข้อมูล Anchor, Positive และ Negative อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม GOR เข้าไปจะช่วยเพิ่มโทษให้กับคู่ข้อมูล Anchor และ Negative ที่มีระยะห่างไม่เพียงพอ ทำให้โมเดลมีความสามารถในการแยกแยะระหว่าง Anchor กับ Negative ได้ดีขึ้น

GOR จะช่วยกระจายตัวข้อมูลให้ดีขึ้นและลดความเสี่ยงของการเกิด overfitting โดยการเพิ่มโทษให้กับค่าที่ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่าง Anchor และ Negative ซึ่งกระบวนการนี้จะส่งผลให้ Triplet Loss Function สามารถแยกแยะข้อมูลได้ดีขึ้น ทำให้โมเดลสามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถ generalize ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อทดสอบกับข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน

การคำนวณ GOR ประกอบด้วยการคำนวณค่า M1 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ dot product ระหว่าง Anchor และ Negative และค่า M2 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ dot product ที่ยกกำลังสอง ระหว่าง Anchor และ Negative จากนั้นกำหนดเงื่อนไข GOR โดยใช้สูตร แสดงดังสมการที่ 1

$$GOR = M1^2 + \max(M2 - \frac{1}{embedding_size}, 0) \quad (1)$$

เพื่อเพิ่มโทษให้กับคู่ข้อมูลที่มีระยะห่างไม่เพียงพอ การใช้ GOR ช่วยให้ข้อมูลมีการกระจายตัวในมิติที่มากขึ้น ส่งผลให้การเรียนรู้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและโมเดลสามารถ generalize ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อทดสอบกับข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน

กระบวนการระบุตัวตน

เมื่อได้ผลลัพธ์เป็นคุณลักษณะของใบหน้าในรูปแบบเวกเตอร์แล้ว ในขั้นการระบุตัวตน งานวิจัยนี้ใช้ Facebook AI Similarity Search (FAISS) เพื่อค้นหาตามความคล้ายคลึงกัน ด้วยจุดเด่นคือด้านความเร็วและความสามารถในการจัดกลุ่มของข้อมูลในรูปแบบ Vector โดยในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองในขั้นตอน Verification สร้างเวกเตอร์จากใบหน้าแมวในฐานะข้อมูล และใช้ FAISS เพื่อสร้าง Index ของใบหน้าแมวเก็บไว้ในหน่วยความจำ เพื่อการเรียกใช้งาน เมื่อมีการส่งใบหน้าแมวเข้ามาใหม่ จะประมวลผลด้วยแบบจำลอง ก่อนจะนำเวกเตอร์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับใบหน้าที่ถูกทำ Index ไว้ในหน่วยความจำ ด้วยวิธีการ KNN ซึ่งจะถูกใช้ในการทำนายใบหน้าจำนวน M รูป ซึ่งค่า K ถูกใช้ในกระบวนการทดสอบ คือ 1,3,4 และ 5

กระบวนการวัดผล

งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในการตรวจจับและระบุตัวตนของแมวโดยใช้ค่า Confusion Matrix ดังที่แสดงใน Table 2 โดยจะใช้การวิเคราะห์ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความระลึก (Recall) ค่าความแม่นยำ คำนวณจากอัตราการทำนายถูกต้องต่อการทำนายทั้งหมด ในขณะที่ค่าความระลึกคือจำนวนที่ทำนายถูกต้องต่อจำนวนที่มีจริง การวัดประสิทธิภาพจะพิจารณาจากค่าความแม่นยำเฉลี่ย (AP) และค่าความแม่นยำเฉลี่ยโดยรวม (mAP) สำหรับแต่ละคลาส โดยมีเป้าหมายที่จะทำนายการระบุตัวตนของแมวในสภาพแวดล้อมที่มีวัตถุอื่นๆ อย่างแม่นยำ

Table 2 Confusion Matrix

		Predicted classes	
		Yes	No
Actual class	Yes	True Positive	False Negative
	No	False Positive	True Negative

ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ อัตราการทำนายถูกต้องต่อการทำนายทั้งหมด โดย n คือจำนวนที่แบบจำลองพยายามทำนายทั้งหมด เช่น การทำนาย 2 ตัว โอกาสที่จะทำนายถูกต้องทั้งหมด คือ ทีพี (TP) = 2 หรือ ทำนายถูกต้อง 1 ตัวทำนาย ผิด 1 ตัว, ทีพี (TP) =1 เอฟพี (FP) =1 หรือ ทำนายผิดหมดทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 2

$$precision = \frac{tp}{tp + fp} = \frac{tp}{n} \quad (2)$$

ค่าความระลึก (Recall) คือ จำนวน ที่ทำนายถูกต้องต่อจำนวนที่มีจริง (Ground Truth) ทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 3

$$recall = \frac{tp}{tp + fn} \quad (3)$$

ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (AP: Average Precision) คำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของค่าความแม่นยำ (Precision) กับค่าความระลึก (Recall) โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งการหาพื้นที่ใต้กราฟจะใช้สมการที่ 4

$$AP = \sum_{k=1}^N p(k) \Delta r(k) \quad (4)$$

โดยที่ N คือ จำนวน รูปทั้งหมดที่ทำนายออกมาทั้งถูกต้องและไม่ถูกต้อง ส่วน P(k) คือ ค่าความแม่นยำ (Precision) ที่ตำแหน่ง ที่เกินขีดแบ่ง (threshold) ที่ค่า k นั้นๆ ส่วน delta r(k) คือการเปลี่ยนแปลงของ ค่าความระลึก (recall) ระหว่าง k-1 และ k ซึ่งการคำนวณหาค่าความแม่นยำเฉลี่ย (AP) นี้ จะหาเฉพาะ เพียง 1 คลาส เท่านั้น ซึ่งภายหลังจากการหาค่าความแม่นยำเฉลี่ยในทุกๆ คลาส แล้วจากนั้นจะนำค่าเอพีมาเฉลี่ย เพื่อคำนวณหาค่าเอเอ็มเอพี (mean Average Precision : mAP) ของแบบจำลองซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$mAP = AP/(n) \quad (5)$$

โดย

n คือจำนวนครั้งที่ทำการประเมิน

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยแบ่งเป็นสองส่วน คือ การตรวจจับใบหน้าและการระบุตัวตนของแมว ขั้นตอนการตรวจจับใบหน้ามุ่งเน้นที่การทำใบหน้าแมวในภาพ รวมถึงการระบุจุดสำคัญบนใบหน้า เช่น หู, ตา, และจมูก ส่วนการระบุตัวตนจะปรับแต่งค่า Hyper Parameter เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับ ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย 2,709 ภาพใบหน้าแมวจาก Kaggle พร้อมเพิ่มข้อมูลคุณลักษณะที่ระบุตำแหน่งจุดสำคัญบนใบหน้า

การทดสอบการตรวจจับใบหน้า

แบบจำลองสำหรับการตรวจจับใบหน้าได้ถูกฝึกฝนเป็นจำนวน 300 epoch เมื่อทดสอบมีค่า mAP อยู่ที่ 0.995 (Figure 9) โดยข้อมูลใบหน้าแมวจากหลากหลายขนาดถูกนำเข้าไปเพื่อตรวจจับใบหน้าโดยมีค่า Threshold 0.5 พบว่าใบหน้าแมวสามารถตรวจจับได้แม้อยู่ในต่างมุม สภาพแวดล้อมหรือมีการบดบัง นอกจากนี้ยังสามารถระบุจุดสำคัญบนใบหน้าของแมวแต่ละตัวได้ (Figure 10)

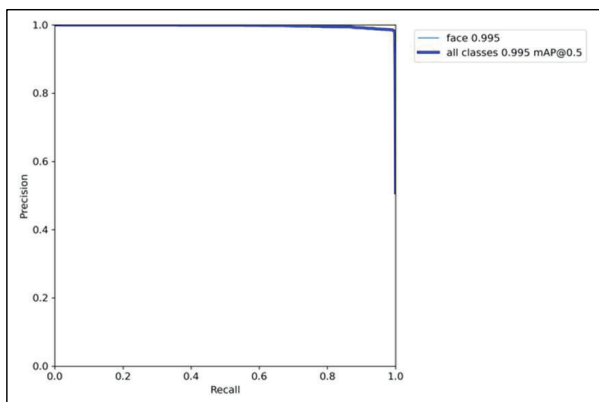


Figure 9 mAP results from testing a model for cat face detection

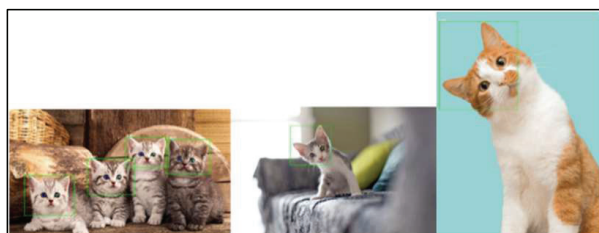


Figure 10 Cat face detection and landmarking

การทดสอบการระบุตัวตน

ในการทดสอบการระบุตัวตน โดยใช้ข้อมูลชุดทดสอบจากงานวิจัยของ Lin และ Kou ซึ่งเป็นภาพใบหน้าของแมว 69 ตัว จำนวน 2,258 ภาพ ประกอบไปด้วยภาพของแมวที่มีทั้งลักษณะที่คล้ายกันและแตกต่างกัน ใบหน้าของแมวถูกนำเข้าไปในแบบจำลองตรวจจับใบหน้าเพื่อให้ได้เฉพาะส่วนใบหน้าของแมว และปรับตำแหน่งของใบหน้าให้อยู่ในลักษณะหน้าตรง โดยให้ดวงตาดูอยู่ในระนาบเดียวกันเพื่อให้ข้อมูลใบหน้าของแมวอยู่ในลักษณะเดียวกัน ตำแหน่งภาพที่หลุดจากเฟรมใบหน้าแมวจะถูกแทนที่ด้วยสีดำ จากนั้นปรับขนาดภาพมีขนาด 224x224 เพื่อใช้ในการประมวลผลต่อไป (Figure 11) แบบจำลองสำหรับการระบุตัวตนจากใบหน้าได้ถูกฝึกฝนเป็นจำนวน 150 epoch ซึ่งมีค่า Loss จากการฝึกฝนอยู่ที่ 1.86 และการทดสอบอยู่ที่ 2.43 (Figure 12)

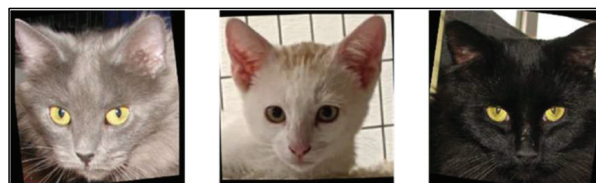


Figure 11 Example of cat face results in a dataset for identification

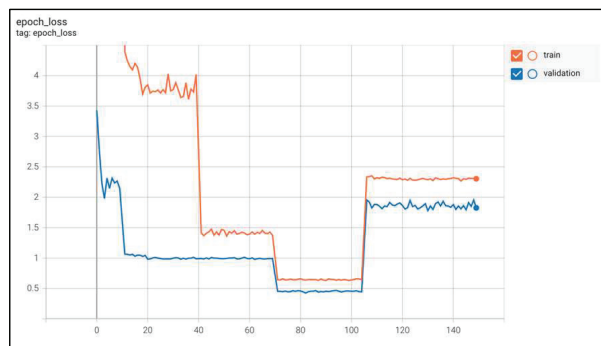


Figure 12 Loss in training dataset for face classification

กระบวนการทดสอบการรู้จำใบหน้า ภาพใบหน้าแมวทั้งหมดจะถูกนำเข้าไปและประมวลผลด้วย Verification Model และได้ผลลัพธ์ออกเป็นเวกเตอร์ของข้อมูลขนาด 128 มิติ โดยก่อนการประมวลผลภาพใบหน้าแมวที่ต้องการค้นหาจะถูกสุ่มจากชุดข้อมูล และใบหน้าที่เหลือจะถูกนำไปประมวลผลและสร้างฐานข้อมูลด้วย FAISS เพื่อใช้สำหรับการทำนายคลาสที่ถูกต้องของข้อมูล โดยเมื่อนำมาลดมิติของข้อมูลด้วยเทคนิค UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) ให้เหลือ 3 มิติและแสดงในรูปแบบกราฟ จะเห็นการกระจายตัวใบหน้าแมวแต่ละตัว (Figure 13)

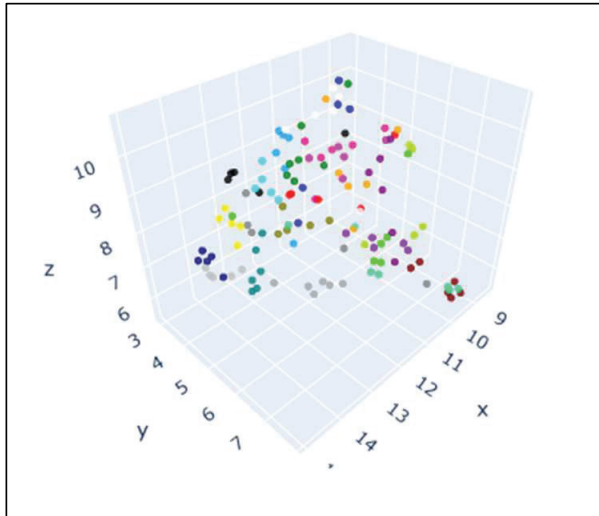


Figure 13 Example distribution of cat face data that has been processed and reduced to 3D

การประเมินผลงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการเดียวกับกระบวนการของมูเก็ทและคณะ (Mougeot *et al.*, 2019) โดยการทดสอบในแต่ละรอบ จะสุ่มคลาสของแมวออกมาจำนวน c คลาส และจำนวนรูปของแมวที่ถูกนำมาประมวลผลถูกแทนด้วย N_c โดยให้จำนวน M แทนค่าจำนวนใบหน้าของแมวที่ต้องการค้นหา เช่น $M=2$ จะเป็นการนำใบหน้าของแมวที่ต้องการค้นหา 2 รูป ก็จะมารวมเวกเตอร์ของทั้งสองรูปเข้าด้วยกันมาใช้ค้นหาข้อมูลที่เหลือในฐานข้อมูล และ k แทนค่าเพื่อนบ้านใน Nearest Neighbor เป็นจำนวนใบหน้าใกล้เคียงที่ต้องการค้นหา โดยค่า k จะเป็นค่าระหว่าง 1 ถึง 5 เท่านั้นเนื่องจากการตั้งค่า k ให้เป็นค่าที่สูงเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพของโมเดลลดลงและไม่สามารถจำแนกใบหน้าของแมวได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การจำกัดค่า k อยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 ยังช่วยให้การประมวลผลมีความรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 500 รอบ โดยแต่ละรอบจะสุ่มคลาสจากชุดข้อมูล โดยมีค่า $c=24$ คลาส และวัดค่าความถูกต้องใน 100 ครั้ง ตารางที่ 3 แสดงค่าความแม่นยำเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด โดยที่ $M=1$ และ $k=1$ จะเป็นตัวแทนของการเรียนรู้แบบ one-shot และสำหรับค่าอื่นๆ ค่า $k=M+1$ เสมอ โดย Figure 14 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การทำนายด้วยค่า $M=1$ และ $k=5$ และผลลัพธ์ค่า Confusion Matrix จากการประเมิน (Figure 15)

Table 3 Model accuracy when adjusting M and k.

M	k	Identification accuracy		
		Average	Minimum	Maximum
1	1	75.9%	71%	80%
2	3	85.2%	78%	89%
3	4	86.8%	84%	89%
4	5	82.8%	78%	87%

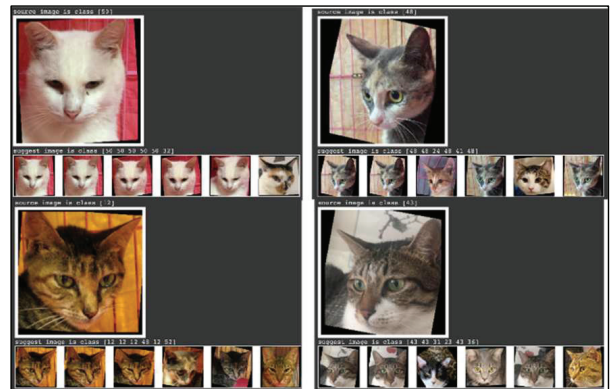


Figure 14 Example of prediction when M=1 and K=5

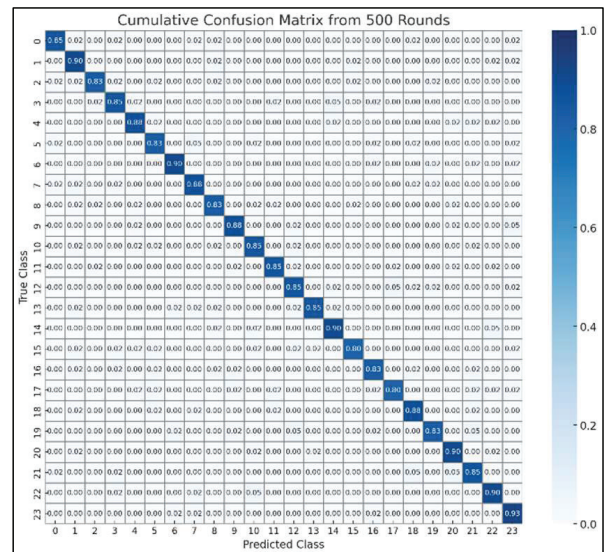


Figure 15 Result of Confusion Matrix size 24x24 of 24 classes of cats

โดยแต่ละแถวของเมทริกซ์แทนคลาสจริง ในขณะที่แต่ละสดมภ์แทนคลาสที่ทำนาย ค่าที่ตำแหน่ง (i, j) ในเมทริกซ์แสดงถึงจำนวนตัวอย่างที่เป็นคลาส i และทำนายว่าเป็นคลาส j หาก $i=1$ และ $j=1$ คือค่าที่ตำแหน่ง $(1,1)$ ในเมทริกซ์ค่านี้แสดงถึงจำนวนของ True Positives (TP) สำหรับคลาสที่ 1 หมายความว่า โมเดลทำนายว่าข้อมูลเป็นคลาสที่ 1 และ

ความจริงคือตัวอย่างเหล่านั้นอยู่ในคลาสที่ 1 เช่นกัน ยิ่งค่าที่ตำแหน่ง (1,1) มีค่าสูงเท่าไรก็แสดงว่าโมเดลทำนายคลาสที่ 1 อย่างแม่นยำมากขึ้น

การอภิปรายผล

จากการทดสอบรู้จำใบหน้าโดยแยกออกเป็นสองส่วนคือกระบวนการตรวจจับใบหน้า และการบวนการระบุตัวตน ผลลัพธ์ของการตรวจจับใบหน้าที่มีค่า mAP อยู่ที่ 0.995 โดยสามารถระบุใบหน้าได้แม้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่าง และสามารถตรวจจับใบหน้าที่มีหลากหลายขนาดและหลากหลายใบหน้าที่ได้ภายในภาพเดียวกัน

ในส่วนของการกระบวนการระบุตัวตนผลลัพธ์สามารถระบุตัวตนได้ตั้งแต่ขั้น one-shot recognition โดยเมื่อเพิ่มจำนวนภาพที่ใช้สำหรับการค้นก็ยิ่งเพิ่มความแม่นยำมากขึ้น โดยสูงสุดเมื่อ $M=3$ และ $k=4$ จะมีความแม่นยำเฉลี่ย 86.8%

สรุปและงานวิจัยในอนาคต

บทความนี้ได้เสนอแบบจำลองในการรู้จำใบหน้าแมว โดยกระบวนการรู้จำใบหน้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการรู้จำใบหน้าและแบบจำลองสกัดคุณลักษณะเพื่อเปรียบเทียบใบหน้าและนำมาระบุตัวตน โดยในส่วนของการตรวจจับใบหน้าที่จะมุ่งเน้นการตรวจหาใบหน้าแมวในภาพที่มีสภาพแวดล้อมที่ตรวจจับได้ยาก โดยต้องสามารถตรวจจับได้หลายใบหน้าที่พร้อมกัน และสามารถที่จะระบุจุดสำคัญบนใบหน้าได้ ได้แก่ ปลายหูซ้าย ปลายหูขวา ตาซ้าย ตาขวา และจมูก เพื่อให้สามารถที่จะนำภาพไปจัดเตรียมและประมวลผลในการตรวจจับได้ใบหน้าที่ได้ในส่วนของกระบวนการระบุตัวตนนั้น แบบจำลองสามารถสกัดคุณลักษณะและระบุตัวตนได้ตั้งแต่ขั้น one-shot recognition โดยเมื่อเพิ่มจำนวนภาพที่ใช้สำหรับการค้นก็ยิ่งเพิ่มความแม่นยำมากขึ้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำเฉลี่ยสูงสุด 86.8% การพัฒนาแบบจำลองสำหรับตรวจจับใบหน้าแมวสามารถใช้การถ่ายโอนความรู้ได้โดยประยุกต์ทรัพยากร มีความแม่นยำสูง และยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับงานอื่นๆ เช่น การพัฒนาระบบลงทะเบียนสัตว์เลี้ยง การนำไปประยุกต์ใช้ในเมืองอัจฉริยะสำหรับสัตว์เลี้ยง หรือการประยุกต์ใช้งานวิจัยเช่นด้านอื่นๆ เช่นการรู้จำสัตว์ป่า การตรวจจับพฤติกรรมสัตว์ป่า เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบของการทำ Face alignment และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมต่างๆ เช่น FAISS, KNN และ SVM ซึ่งอาจเป็นประเด็นสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์, & สัจจาภรณ์ ไวจรรยา. (2564). *Fundamental of deep learning in practice*. Hytexts Interactive Limited.
- ปริญญญา สงวนสัตย์. (2562). *Artificial intelligence with machine learning, AI สร้างได้ด้วยแมชชีนเลิร์นนิง*. Infopress.
- Chen, Y. C., Hidayati, S. C., Cheng, W. H., Hu, M. C., & Hua, K. L. (2016). Locality constrained sparse representation for cat recognition. In *MultiMedia Modeling* (pp. 140-151).
- Ethem, A. (2010). *Introduction to machine learning second edition*. The MIT Press Cambridge.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- Hermans, A., Beyer, L., & Leibe, B. (2017). *In defense of the triplet loss for person re-identification*. arXiv preprint arXiv:1703.07737.
- Kantar Worldpanel. (2022, December 5). *Thailand pet food market trends*. <https://www.kantarworldpanel.com/th/news/2022-Thailand-Pet-Food-Market-Trends>
- Klein, A. (2019). *Pet cat face verification and identification*. Stanford University, CS230 Fall 2019.
- Kumar, S., & Singh, S. K. (2018). *Monitoring of pet animal in smart cities using animal biometrics*. Indian Institute of Technology.
- Kumar, S., & Singh, S. (2014). Biometric recognition for pet animal. *Journal of Software Engineering and Applications*, 7, 470-482.
- Lai, K., Tu, X., & Yanushkevich, S. (2019). Dog identification using soft biometrics and neural networks. In *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8).
- Lin, T. Y., & Kuo, Y. F. (2018). Cat face recognition using deep learning. *ASABE Annual International Meeting*.
- Liu, J., Kanazawa, A., Jacobs, D., & Belhumeur, P. (2012). Dog breed classification using part localization. In *Computer Vision – ECCV 2012* (pp. 172-185).
- Montenegro, L., Abreu, M., Fred, A., & Machado, J. M. (2022). Human-assisted vs. deep learning feature extraction: An evaluation of ECG features extraction methods for arrhythmia classification using machine learning. *Applied Sciences*.

- Moreira, T. P., Perea, M. L., Werneck, R. O., & Valle, E. (2017). Where is my puppy? Retrieving lost dogs by facial features. *Multimedia Tools and Applications*, 76, 15325-15340.
- Mougeot, G., Li, D., & Jia, S. (2019). A deep learning approach for dog face verification and recognition. In *PRICAI 2019: Trends in Artificial Intelligence* (pp. 418-430).
- Qi, D., Tan, W., Yao, Q., & Liu, J. (2022). *YOLO5Face: Why reinventing a face detector*. arXiv preprint arXiv:2105.12931. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2105.12931>
- Redmon, J., Divvala, S. K., Girshick, R. B., & Farhadi, A. (2016). *You only look once: Unified, real-time object detection*. arXiv preprint arXiv:1506.02640. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1506.02640>
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2015). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39, 1137-1149. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>
- Ruan, Z., Wang, G., Xue, J., Lin, X., & Jiang, Y. (2014). Detection of user-registered dog faces. *Neurocomputing*, 142, 256-266.
- Yoon, B., So, H., & Rhee, J. (2021). A methodology for utilizing vector space to improve the performance of a dog face identification model. *Applied Sciences*, 11, 2074.
- Zhang, X., Yu, F. X., Kumar, S., & Chang, S. F. (2017). Learning spread-out local feature descriptors. In *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (pp. 4605-4613).

การจัดทำแผนที่ด้วยความละเอียดสูง เพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ

High-Resolution mapping for wind energy potential assessment in Chaiyaphum Province

ภูชัชฌิมพงษ์ พิมพาจันทร์¹, สุภชัย พลน้ำเที่ยง^{2*}, สุพิชชา ถวิลไพร³ และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต²
Puchitpong Pimpajan¹, Supachai polnumtiang^{2*}, Supitcha Tawinprai³ and Kiatfa Tangchaichit²

Received: 8 March 2024 ; Revised: 6 June 2024 ; Accepted: 14 August 2024

บทคัดย่อ

การจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิและค้นหาพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับการติดตั้งกังหันลมโดยจัดทำแผนที่ลมในระดับไมโครสเกล ซึ่งอาศัยการสร้างแบบจำลองบรรยากาศร่วมกันระหว่าง Mesoscale Compressible Community Model (MC2) และ Microscale Model (Ms-micro) ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 200 เมตร โดยอาศัยข้อมูลสภาพอากาศจากฐาน NCEP/FNL Operational Global Analysis เป็นระยะเวลา 10 ปี ผลจากแผนที่ลมที่ระดับความสูง 150 เมตรพบว่า จังหวัดชัยภูมิมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ประมาณ 3.34 เมตรต่อวินาที ซึ่งพื้นที่ที่มีความเร็วลมมากกว่า 3.51 เมตรต่อวินาที ได้แก่ พื้นที่ตำบลกุดเลาะ, ตำบลท่ามะไฟหวาน, ตำบลซับสีทอง, ตำบลสระโพนทองและตำบลท่าหินโงง ผลการวิเคราะห์ด้านพลังงานพบว่า การใช้กังหันลมขนาด 2.5 เมกะวัตต์สามารถผลิตพลังงานได้เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับกังหันลมรุ่นอื่น งานวิจัยนี้พื้นที่อำเภอกุดเลาะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุดจากทุกพื้นที่โดยสูงถึง 20,994 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี และมีค่าต้นทุนพลังงานหรือ COE ต่ำสุดที่ 0.53 มีคาปาซิตีแฟคเตอร์ 24% แสดงให้เห็นถึงศักยภาพพลังงานลมที่เหมาะสมสำหรับการประเมินเพื่อลงทุนติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมเพิ่มเติมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

คำสำคัญ: ศักยภาพของพลังงานลม, แผนที่ทรัพยากรลม แบบจำลองบรรยากาศ, แบบจำลองการไหลของลม, จังหวัดชัยภูมิ

Abstract

Assessing wind power capacity Evaluate the wind energy potential in Chaiyaphum Province and identify suitable locations for wind turbine installation. involves generating microscale wind maps. This study utilized collaborative atmospheric modeling combining Mesoscale Compressible Community Model (MC2) and Microscale Model (Ms-micro) with a spatial resolution of 200 m, using the atmospheric database from NCEP/FNL for 10 years. At an altitude of 150 m, the wind map data indicate that Chaiyaphum province has an average wind speed of 3.34 m/s. Locations experiencing wind speeds over 3.51 m/s are Kut Lo Subdistrict, Tha Ma Fai Wan Subdistrict, Sap Si Thong Subdistrict, Sa Phon Thong Subdistrict, and Tha Hin Non Ngam Subdistrict. Energy research determined that a 2.5 MW generates the highest power output compared to other turbines. The Kut Lo District region generated the maximum electrical energy among all places, producing 20,994 MWh/year in this investigation. The 24% capacity factor indicates the potential of wind energy for assessing the feasibility of investing in new wind power facilities in the northeastern portion of Thailand.

Keywords: Wind energy potential, wind resource maps, atmospheric modeling, wind flow modeling, Chaiyaphum Province

¹ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

² อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

³ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
*ติดต่อผู้พิมพ์: สุภชัย พลน้ำเที่ยง อีเมล: supapol@kku.ac.th

¹ Master degree student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand.

² Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand.

³ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Muang District, Khon Kaen 40000, Thailand.

* Corresponding author: Supachai Polnumtiang, Email: supapol@kku.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกมีแนวโน้มในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการใช้พลังงานฟอสซิลนั้นก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างฉับพลันและกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าว ทั่วโลกจึงได้ตระหนักถึงความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทนเพื่อแก้วิกฤติทางสภาพอากาศ (Martinez & Iglesias, 2022) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดอุณหภูมิของโลกและลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศให้เป็นศูนย์ (Net-zero) ภายในปี 2573 (Dominic, 2021) พลังงานทดแทนนั้นเป็นพลังงานสะอาดที่ใช้แล้วไม่หมดไป ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานน้ำ, พลังงานชีวมวล, และพลังงานลม เมื่อกล่าวถึงพลังงานลมนั้น ถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนที่เป็นที่นิยมในหลายประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2564 จากรายงานพบว่าทั่วโลกมีกำลังการผลิตจากพลังงานลมรวมกันสูงถึง 845 GW (Gibb *et al.*, 2022) ในส่วนของประเทศไทยนั้นกำลังผลิตจากพลังงานลมรวมกันที่ 1,545 MW โดยส่วนใหญ่กำลังการผลิตอยู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ติดตั้งที่จังหวัดนครราชสีมา อำเภอสีคิ้ว ตำบลห้วยบงอำเภอตำบลดอนขุนทด ไปจนถึง อำเภอเทพสถิต ชัยใหญ่ และอื่นๆ ในจังหวัดชัยภูมิ

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2566b) ทั้งหน่วยงานภาครัฐและเอกชนได้เล็งเห็นถึงความสำคัญต่อการพัฒนาด้านพลังงานลมที่เป็นพลังงานหมุนเวียน เพื่อมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและก๊าซธรรมชาติที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยในปี 2566 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานมีปริมาณทั้งหมด 50,165 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) คิดเป็นอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.3 และมีการผลิตพลังงานหมุนเวียนและพลังงานอื่นรวมไปถึงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นปริมาณทั้งหมด 13,443 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 37.4 มีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.1 จากปี 2565 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2566a) กระทรวงพลังงานได้วางแผนเพื่อพัฒนาและเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนโดยการประกาศใช้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan 2018-2037 : AEDP 2018-2037) หรือแผน AEDP มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนรวมเท่ากับ 20,766 MW และพลังงานลมก็เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่มีความสำคัญต่อการผลิตไฟฟ้าและจัดอยู่ในแผนเพิ่มกำลังการผลิต โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมให้เป็น 2,989 MW ภายในปี พ.ศ. 2580 (EPPO, 2020) จะเห็น

ได้ว่าพลังงานลมนั้นเป็นตัวเลือกที่สำคัญต่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และตอบสนองต่อนโยบายพลังงานทดแทนของประเทศ และนโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศของโลกอีกด้วย

เมื่อปี 2557 ได้มีการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมในระดับประเทศโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศ KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) เทียบกับข้อมูลลมจากสถานีวัดลม 4 สถานีทั่วประเทศตั้งแต่ปี ค.ศ.1995 ถึง ค.ศ.2009 พบว่าประเทศไทยมีความเร็วลมเฉลี่ย 3 ถึง 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งพื้นที่ภาคเหนือและภูเขาสูงทางภาคใต้จะมีความเร็วลมสูงถึง 6 เมตรต่อวินาที จึงเหมาะกับการติดตั้งกังหันลมความเร็วลมต่ำ (Janjai *et al.*, 2014) ในส่วนของการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปี 2565 มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฟาร์มกังหันลมอำเภอเทพารักษ์ จังหวัดนครราชสีมา (Deepo *et al.*, 2021) โดยใช้กังหันลม 6 รุ่นที่มีขนาด 18 เมกะวัตต์ และความสูง 157 เมตร และอาศัยระบบ SCADA ในการวัดข้อมูลและรวบรวมข้อมูลเป็นเวลาหนึ่งปีพบว่ามีกำลังการผลิตกังหันลมประจำปี 38.82% การผลิตพลังงานทั้งหมดอยู่ที่ 64.99 จิกะวัตต์ ชั่วโมง ต่อปีและมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดในช่วงเดือนกรกฎาคม โดยมีความเร็วเฉลี่ย 7.61 เมตรต่อวินาที ต่อในปี 2566 มีการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลม ในพื้นที่ 4 จังหวัด คือหนองคาย อุดรธานี สกลนคร และจังหวัดกาฬสินธุ์ (Tawinprai *et al.*, 2023a) โดยใช้แบบจำลอง Mesoscale Compressible Community (MC2) สำหรับแผนที่ระดับเมโซ และใช้โมเดล MS-Micro สำหรับการจำลองแผนที่ระดับไมโคร พบว่าพื้นที่บนภูเขาในจังหวัดกาฬสินธุ์มีความเร็วลมดีและศักยภาพในการผลิตพลังงานมากที่สุด

ซึ่งการประเมินทรัพยากรลมในระดับประเทศนั้นไม่เพียงพอต่อการระบุพื้นที่ที่เฉพาะเจาะจงในระดับจังหวัด ดังนั้นแผนที่ทรัพยากรลมที่ใช้กริดที่มีความละเอียดสูงนั้น สามารถให้ข้อมูลที่บ่งชี้ถึงศักยภาพของลมเฉพาะแหล่งได้เหมาะสมกว่า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการประเมินศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่งในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ โดยการทำแผนที่ทรัพยากรลมโดยใช้แบบจำลองบรรยากาศใน WEST Toolkit ทั้งระดับเมโซสเกลและไมโครสเกล ร่วมกับข้อมูลภูมิอากาศจากฐานข้อมูล NCEP/FNL Operational Global Analysis (Research Data Archive, 2023) ในช่วงเวลา 10 ปี ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 เพื่อสำรวจหาพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมเหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ โดยประเมินจากพลังงานที่ผลิตได้ต่อปีและค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

พื้นที่ศึกษาของโครงการ

พื้นที่ศึกษาวิจัยจังหวัดชัยภูมิ ซึ่งอยู่ในทิศตะวันตกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีพื้นที่รวมประมาณ 12,778 ตารางกิโลเมตร (กองนโยบายและแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2022) ซึ่งที่ตั้งของจังหวัด อยู่ระหว่างละติจูดที่ 15°19'49.364" N ถึง 15°19'49.364" N และลองจิจูดที่ 101°18'52.351" E ถึง 101°18'52.351" E ทางทิศตะวันตกมีพื้นที่ติดกับจังหวัดเพชรบูรณ์ ทางทิศใต้มีพื้นที่ติดกับจังหวัดลพบุรีและจังหวัดนครราชสีมา แสดงใน Figure 1

พื้นที่ที่ต้องการศึกษานั้น มีลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปประกอบด้วยป่าไม้และภูเขาคิดเป็นร้อยละ 50 ของพื้นที่จังหวัด (กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด สำนักงานจังหวัดชัยภูมิ, 2567) ซึ่งเป็นเทือกเขาแนวยาวตั้งแต่มุมเหนือจนถึงส่วนใต้ของจังหวัดและมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 1,336 เมตร ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ผิวในพื้นที่วิจัยแสดงใน Figure 2

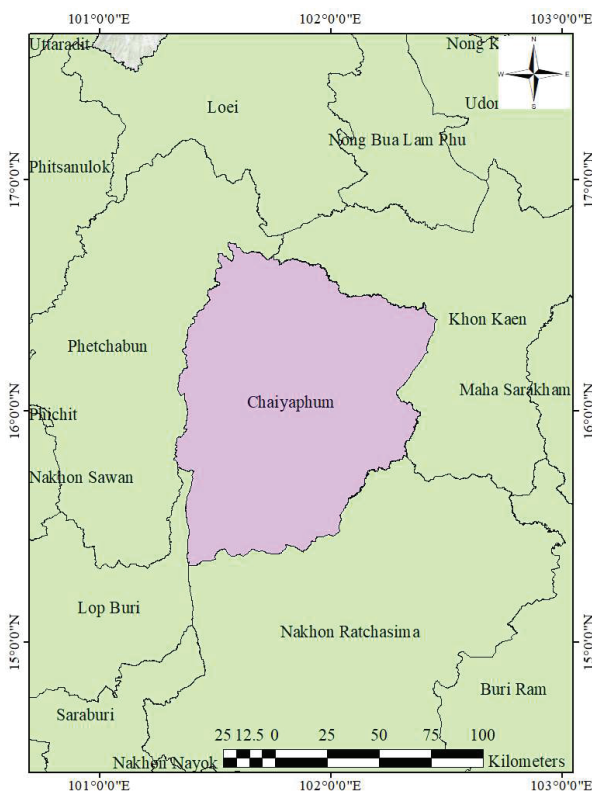


Figure 1 The location of the research area

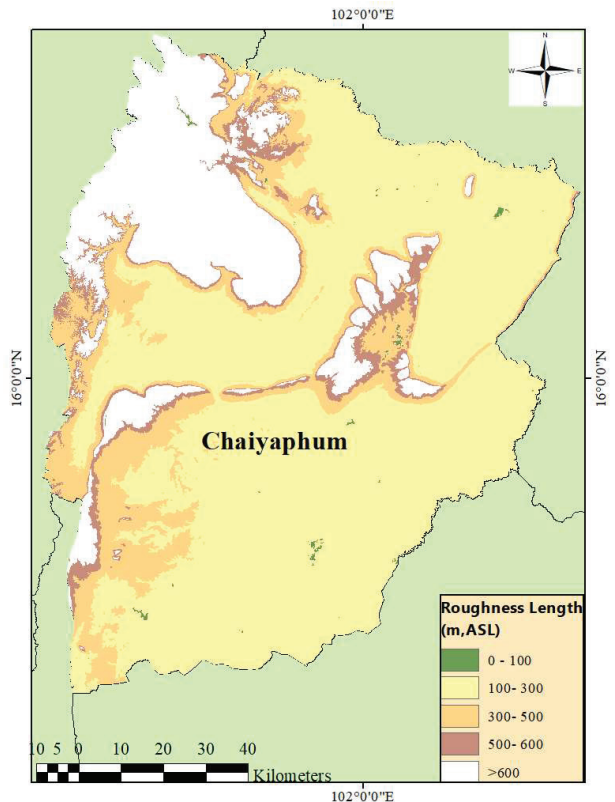


Figure 2 Digital Elevation Model (DEM) of the study area

ระเบียบวิธีการวิจัย

ในการสร้างแผนที่ทรัพยากรลมนั้น เริ่มจากการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพอากาศจากฐานข้อมูล NCEP/FNL Operational Global Analysis ซึ่งจะเก็บข้อมูลสภาพอากาศจากระบบสื่อสารโลก (Global Telecommunications System, GTS) ทุก 6 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 10 ปีตั้งแต่ปี 2555 ถึง 2565 จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาจัดเรียงโดยอาศัย 3 ตัวแปรได้แก่ความเร็วของลม, ทิศทางลม, และลมเฉือน เพื่อนำไปคำนวณความถี่ในการเกิดลม (Gasset and Yu, 2022) ในส่วนของข้อมูลภูมิศาสตร์ทางกายภาพ เช่น ความสูงสิ่งก่อสร้าง, พืชพรรณที่ปกคลุมพื้นดิน รวมไปถึงความสูงของพื้นผิวนั้น อยู่ในฐานข้อมูล GenGeo ซึ่งถูกรวบรวมไว้ใน WEST Toolkit โดยข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองบรรยากาศเพื่อนำไปสร้างแผนที่ทรัพยากรลม

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองของชั้นบรรยากาศจะใช้ซอฟต์แวร์ WEST (Wind Energy Simulation Toolkit) โดยจะแบ่งเป็น 2 ระดับหลัก ได้แก่ ระดับเมโซสเกลและระดับไมโครสเกล โดยในระดับเมโซนั้นจะเป็นการสร้างแบบจำลองระดับปานกลาง โดยใช้แบบจำลอง MC2 ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 3 กิโลเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 400 x 400 กิโลเมตร (Tawinprai et al., 2023b) หลังจากกระบวนการสร้างแบบจำลองระดับเมโซจะได้ข้อมูลทางสถิติของลมที่เกิดขึ้นในพื้นที่วิจัย จากนั้นจึงนำข้อมูลสถิติดังกล่าวเป็นข้อมูล

นำเข้าสำหรับการสร้างแบบจำลองระดับไมโครโดยใช้แบบจำลอง MS-Micro ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 200 เมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 40 x 40 กิโลเมตรจนครอบคลุมพื้นที่วิจัยอย่างสมบูรณ์ (Gasset *et al.*, 2012) โดยในส่วนของแบบจำลองระดับไมโครสเกลไม่สามารถใช้ฐานข้อมูล GenGeo ได้เนื่องจากความละเอียดของข้อมูลไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูงและข้อมูลการใช้ที่ดินจากกรมพัฒนาการใช้ที่ดิน (Land Development Department 2022) ในการสร้างแบบจำลอง

หลังจากกระบวนการสร้างแบบจำลองบรรยากาศในระดับไมโคร ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนถูกส่งออกไปเพื่อทำการสอบเทียบความเร็วและความถี่ของการเกิดลมกับข้อมูลจากเสาวัดลม จากนั้นจึงส่งออกผลลัพธ์ดังกล่าวไปยังซอฟต์แวร์ ArcGIS เพื่อแสดงผลเป็นแผนที่ทรัพยากรลม จากนั้นจึงทำการคำนวณพลังงานที่ผลิตได้ต่อปีและค่าคาปาซิตีแฟคเตอร์ โดยแผนผังระเบียบวิธีวิจัยแสดงใน Figure 3

Table 1 Geographic features and average wind speed at an altitude of 150 m (AGL)

Altitude (m, AGL)	Mean wind speed (m/s)	Wind speed range (m/s)
90	2.78	1.24 – 4.26
150	3.34	1.86 - 4.93

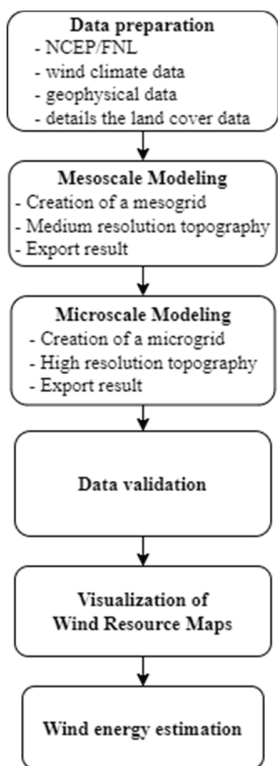


Figure 3 Research method scheme

ข้อมูลการตรวจวัด

ในการสร้างแผนที่ทรัพยากรลมนั้น จำเป็นจะต้องสอบเทียบข้อมูลความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัดเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความแม่นยำของแผนที่ดังกล่าว โดยข้อมูลตรวจวัดดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมจากเสาวัดลมที่ตั้งอยู่ที่จังหวัดชัยภูมิ โดยตำแหน่งที่ตั้งของเสาวัดลมแสดงใน Figure 4 ซึ่งเสาวัดลมดังกล่าวตั้งอยู่ที่ละติจูดที่ 16.11 (°N) และลองจิจูดที่ 102.09 (°E) ช่วงเวลาที่ตรวจวัดระหว่างปี พ.ศ. 2559 ถึง 2563 และมีระดับความสูงเหนือพื้นดิน 90 เมตร (Above Ground Level, AGL)

ความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดสามารถนำมาอ้างถึงในรูปของประสิทธิภาพของแบบจำลองการไหลของลม โดยการประมาณค่าทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้อัตราส่วนความเร็วลมที่ได้จากการวัดจริงต่อค่าที่ได้จากแบบจำลอง (M/P Ratio) และเปอร์เซ็นต์ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (Percent Mean Relative Error, PMRE) โดยการคำนวณค่าทางสถิติดังกล่าวจะใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดของเสาวัดลมและข้อมูลที่ได้จากแผนที่ทรัพยากรลมที่ความสูงระดับเดียวกัน ในการคำนวณดังสมการที่แสดงในสมการ (1) และ (2) ต่อไปนี้ (Tawinprai *et al.* 2022)

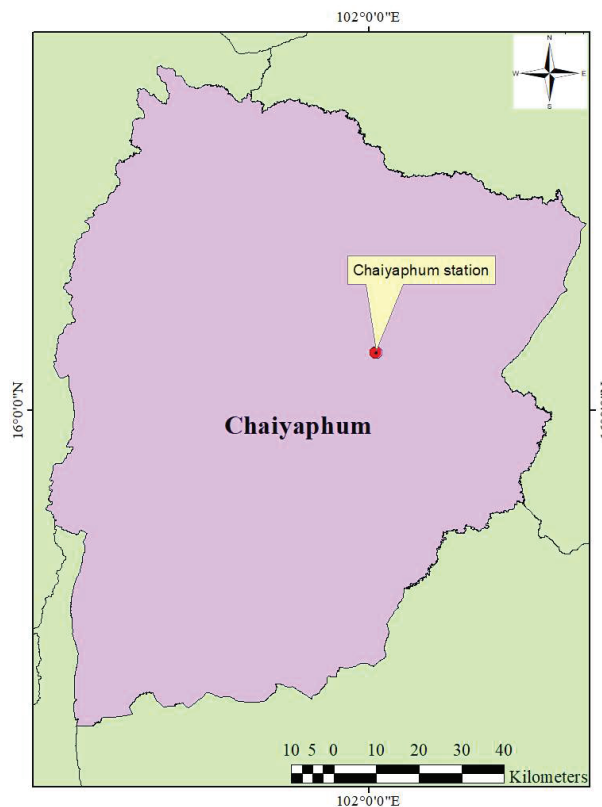


Figure 4 The location of wind measurement masts within the research area

$$M/P = \frac{\text{Observed wind speed}}{\text{Predict wind speed}} \quad (1)$$

$$PRME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

O_i คือ ความเร็วลมที่ได้จากการตรวจวัด (เมตรต่อวินาที)

P_i คือ ความเร็วที่ได้จากแบบจำลอง (เมตรต่อวินาที)

n คือ จำนวนตัวแทนข้อมูลในช่วงเวลาที่ทำการวิจัย

การประเมินศักยภาพพลังงานลม

ในการประเมินศักยภาพพลังงานลมในเฉพาะพื้นที่เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการจัดตั้งและพัฒนาโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดไม่เกิน 10 MW (VSPP 10 MW) จะอาศัยข้อมูลความเร็วลมและความถี่ของลมที่เกิดขึ้นในท้องถิ่นนั้น มาคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี ในขั้นตอนนี้ผลลัพธ์ของความเร็วลมที่ได้จาก GIS จะถูกนำมาจัดเรียงตามช่วงความเร็วลมและความถี่ของการเกิดลมต่อปี จากนั้นจึงนำผลการจัดเรียงที่ได้มาคำนวณหาพลังงานที่ผลิตได้ต่อปี (Annual Energy Production, AEP) และคาปาซิตีแฟกเตอร์ (Capacity Factor, CF) หรือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจริงในรอบ 1 ปี ตามสมการ 3 และสมการ 4 (Kim et al., 2022)

$$AEP = 8,760 \int_{U_{cut\ in}}^{U_{cut\ out}} P_t(u) f(u) du \quad (3)$$

$$CF = \frac{AEP}{N \times P_r} \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่

$U_{cut\ out}$ คือ ความเร็วสูงสุดที่กังหันลมหยุดทำงาน (เมตรต่อวินาที)

$U_{cut\ in}$ คือ ความเร็วเริ่มต้นที่กังหันเริ่มทำงาน (เมตรต่อวินาที)

8,760 คือ จำนวนชั่วโมงในหนึ่งปี (ชั่วโมง/ปี)

$P_t(u)$ คือ เส้นโค้งกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

P_r คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลมที่สามารถผลิตได้ (MW)

N คือ จำนวนกังหันลม

$f(u)$ คือ ฟังก์ชันความถี่ของการเกิดลม

ในงานวิจัยนี้ คิดการสูญเสียการผลิตอันเนื่องมาจากการหยุดทำงานของกังหันลม รวมถึงการเกิดกระแสอากาศปั่นป่วน (wake) และการหยุดทำงานของการเชื่อมต่อโครงข่ายอยู่ที่ประมาณ 10% (Polnumtiang & Tangchaichit, 2022a)

การประเมินความเป็นไปได้ของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานลม

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบความเป็นไปได้ขอโรงไฟฟ้าพลังงานลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ โดยการวิเคราะห์การลงทุนโดยรวมที่จำเป็นสำหรับโครงการติดตั้งพลังงานลมตลอดอายุการใช้งาน โดยพิจารณาจากผลผลิตพลังงาน การวิเคราะห์นี้ดำเนินการโดยการคำนวณต้นทุนพลังงาน (COE) ภายใต้สมมุติฐานของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดไม่เกิน 10 MW (VSPP 10 MW)

ในการวิจัยนี้ COE จะกำหนดโดยการหารการลงทุนโดยรวมและการจ่ายเงินรายปีของกังหันแต่ละเครื่องด้วยพลังงานที่ปล่อยออกมาของกังหันลมตลอดอายุการใช้งาน แต่ การคำนวณนี้แสดงโดยสมการที่ 5 (Polnumtiang & Tangchaichit, 2022b)

$$COE = \frac{Comr \frac{(1+r)^i - 1}{(1+r)^i} + I}{AEP \times N} \quad (5)$$

โดยที่ C_{omr} แทนต้นทุนการดำเนินงาน การบำรุงรักษา และการซ่อมแซม ค่าความเป็น 2% ของราคากังหันลม (USD/kW) i คืออัตราดอกเบี้ยคือ 7% r คืออัตราคิดลดที่ตั้งไว้ที่ 7% และ y คิดเป็น 1.2% ของอัตราเงินเฟ้อ (Bank of Thailand, 2023) คือ ต้นทุนเริ่มต้น ได้แก่ ต้นทุนที่ดิน ราคากังหัน ค่าติดตั้ง และการรวมโครงข่าย โดยคำนวณเป็นร้อยละ 30 ของราคากังหันลม (USD) และ AEP แทนค่ารายปี การผลิตพลังงานของฟาร์มกังหันลม หน่วยเป็นเมกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี (MWh/ปี) ราคากังหันลมอยู่ที่ประมาณ 1,175 USD/kW ตามข้อมูลจากสำนักงานพลังงานทดแทนระหว่างประเทศ (IRENA, 2023)

ผลการวิจัยและอภิปราย

แผนที่ทรัพยากรลม

แผนที่ทรัพยากรลมระดับเมโซที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 3 กิโลเมตร ที่ระดับความสูง 90 และ 150 เมตร (AGL) แสดงใน Figure 5 – 6 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันแผนที่ทรัพยากรลมระดับไมโครที่มีความละเอียดพื้นที่ 200 เมตรที่ระดับความสูง 90 และ 150 เมตร (AGL) แสดงดัง แสดงใน Figure 7 - 8 ตามลำดับ

จากแผนที่ทั้งระดับเมโซและไมโครที่ได้มีค่าความเร็วลมตั้งแต่ 1.86 ถึง 4.93 เมตรต่อวินาทีและในบริเวณพื้นที่ภูเขาในจังหวัดชัยภูมิมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3.79 ถึง 4.93 เมตรต่อวินาที รายละเอียดของความเร็วมเฉพาะในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ แสดงดัง Table 1 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของลมปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ของลมเหนือสิ่งกีดขวางในพื้นที่เฉพาะ ได้แก่การปกคลุมของพืชพรรณ, พฤติกรรมสิ่งแวดล้อม, ความสูงของภูมิประเทศ, โครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง, ความขรุขระของพื้นผิว และมรสุมท้องถิ่น นอกจากนี้การใช้ของลมยังได้รับอิทธิพลจากแรงเฉื่อยของลม โดยการไหลของลมที่ชั้นล่างที่อยู่เหนือพื้นดินนั้น จะถูกลักษณะของภูเขาด้านการไหล ทำให้เกิดแรงเสียดทานหรือแรงต้านที่กระทำต่อบรรยากาศชั้นล่าง ส่งผลให้ความเร็วลมใกล้พื้นผิวโลกมีแนวโน้มลดลงในพื้นที่ที่มีความขรุขระสูง (Mundu *et al.*, 2022) จากลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดชัยภูมิที่มีภูเขาสูงในตอนบนของประเทศ

จึงส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวมีความเร็วลมสูงกว่าบริเวณอื่นในจังหวัดชัยภูมิ ดังแสดงในแผนที่ทรัพยากรลม Figure 5 – 8

ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองระดับเมโซของแผนที่ทรัพยากรลมกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด จะทำการเปรียบเทียบในระดับความสูงเดียวกัน ผลการคำนวณค่า MP ratio และ PMRE แสดงใน Table 2 ค่า MP ratio ที่ได้นั้นอยู่ในช่วง 1.21 ถึง 1.22 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากแผนที่ในระดับเมโซมีแนวโน้มที่จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วลมเฉลี่ยจากที่เก็บข้อมูลของเสาวัดลม นอกจากนี้ค่า PMRE อยู่ในช่วง 17.29 ถึง 18.27% ซึ่งอยู่ในช่วงต่ำกว่า 20% (Waewsak *et al.*, 2015) ได้แสดงให้เห็นว่าแผนที่ความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองระดับเมโซในและไมโครสเกลในงานวิจัยนี้ เหมาะสมในการประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ

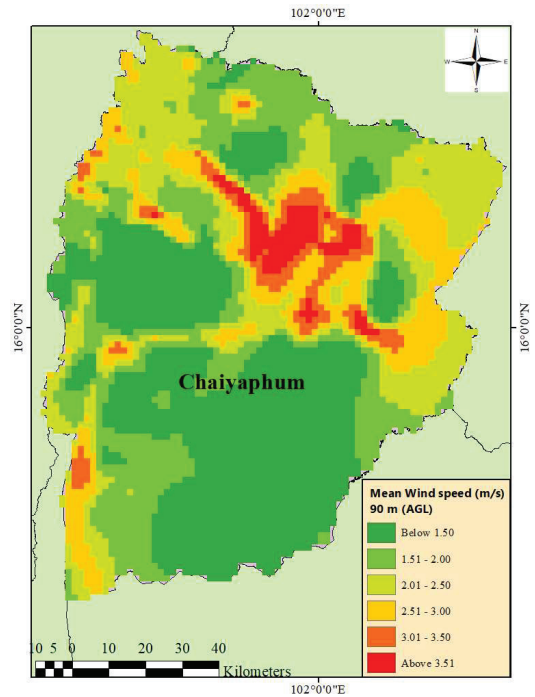


Figure 5 Mesoscale wind resource map of Chaiyaphum province at an altitude of 90 m

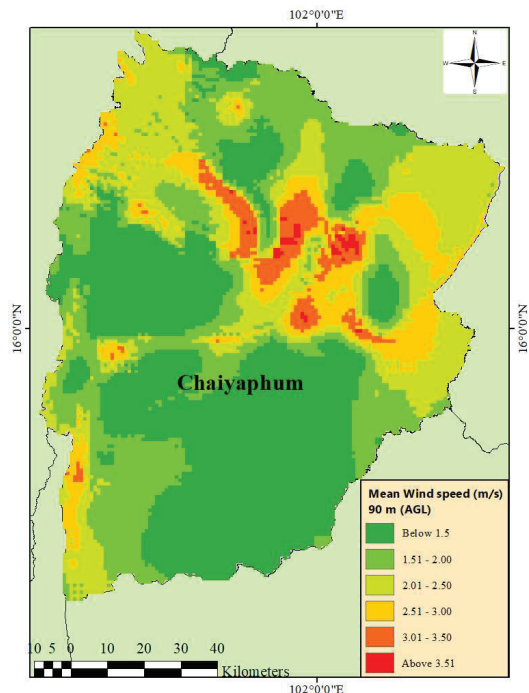


Figure 6 Mesoscale wind resource map of Chaiyaphum province at an altitude of 150 m

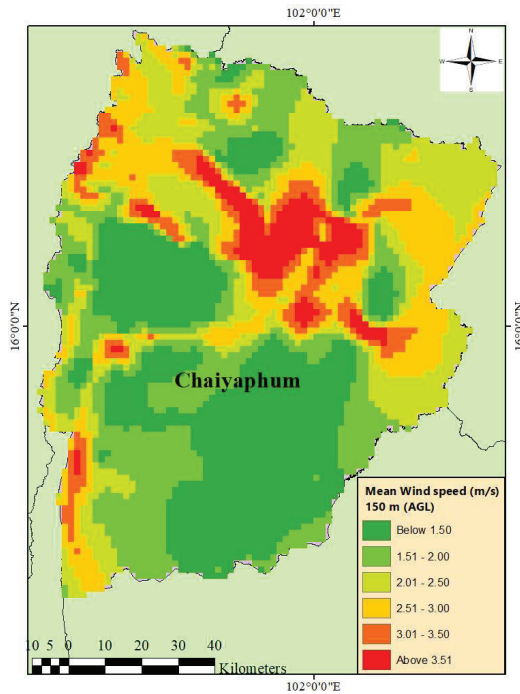


Figure 7 Microscale wind resource map of Chaiyaphum province at an altitude of 90 m

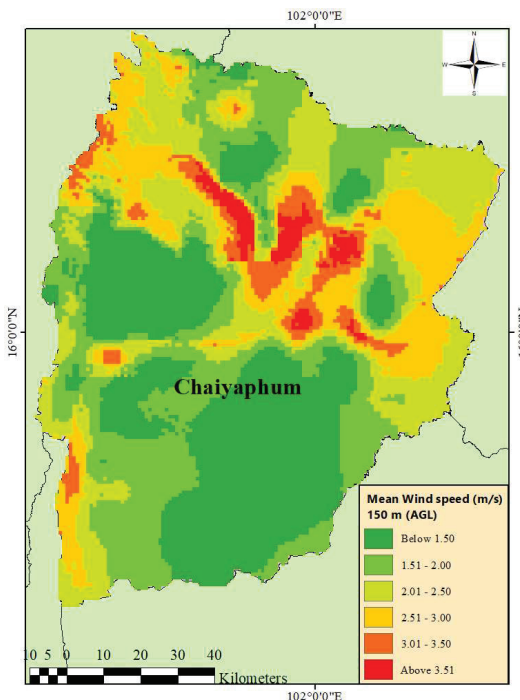


Figure 8 Microscale wind resource map of Chaiyaphum province at an altitude of 150

การคัดเลือกกังหันลม

ในการเลือกกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมในพื้นที่วิจัยนี้จะประเมินจากความเร็วลมและความถี่ที่เกิดลมภายในพื้นที่วิจัยจากแผนที่ทรัพยากรลมที่ระดับความสูง 150 เมตรเหนือพื้นดิน มาใช้เพื่อระบุความเร็วขั้นต่ำที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนเพื่อผลิตพลังงาน แสดงดัง Table 1 ซึ่งแสดงถึงความเร็วลมที่เกิดขึ้นในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิมีค่าตั้งแต่ 1.86 ถึง 4.93 เมตรต่อวินาที นั้นแสดงให้เห็นถึงความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนเพื่อทำงานคือ 2 เมตรต่อวินาที

ดังนั้น กังหันลมที่มีความเร็วเริ่มต้นที่ 2 เมตรต่อวินาทีจึงถูกเลือกเพื่อใช้ในการประเมินพลังงานที่ผลิตได้ต่อปีในพื้นที่วิจัยนี้ สมบัติทางกลของกังหันลมแสดงดัง Table 3 และแสดงเส้นโค้งกำลังดังใน Figure 9

การประเมินพลังงานที่ผลิตได้

ผลการประเมินภายใต้นโยบายพลังงานลมของประเทศไทยที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSP 10 MW) พลังงานที่ผลิตได้ต่อปี (AEP) และค่าปาดิตีแฟกเตอร์ (CF) ของกังหันลมทั้ง 4 รุ่นแสดงดัง Figure 11 - 12 จากพลังงานที่ผลิตได้ต่อปีแสดงให้เห็นว่ากังหันลมที่ผลิตพลังงานได้สูงใกล้เคียงกัน 2 รุ่นคือ G126-2.5 MW และ G132-3.3 MW โดยในพื้นที่ตำบลกุดเลาะ(Kut lo) และท่ามะไฟหวาน (Tha mafai wan) ที่สามารถผลิตพลังงานได้ใกล้เคียงกัน แต่พื้นที่สามารถผลิตพลังงานได้สูงที่สุดคือตำบลกุดเลาะที่ 20,993 เมกะวัตต์ ชั่วโมงต่อปีซึ่งสอดคล้องกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ดังกล่าว และจากข้อมูลลมดังกล่าวพบว่าค่าค่าปาดิตีแฟกเตอร์ในจังหวัดชัยภูมิจะอยู่ในช่วง 5.20% ถึง 23.97%

การประเมินความเป็นไปได้ของโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานลม

จากผลการประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์จากสมการที่ 5 ซึ่งการคำนวณไม่รวมค่าขนส่งและภาษีมายังประเทศไทย การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ได้ดำเนินการบนพื้นที่ที่มีศักยภาพดังแสดงใน Figure 11 และ 12 โดยการใช้การคำนวณ COE มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลมในจังหวัดชัยภูมิ COE ดังที่ระบุใน Figure 13 แตกต่างกันไป

ระหว่าง 0.043 ถึง 0.207 USD/kWh กังหันลม G126-2.5 MW ให้ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกังหันอื่นๆ ที่มีกำลังการผลิตเท่ากัน พบว่าในทุกพื้นที่ที่คัดเลือกมา มีค่าต้นทุนพลังงานใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 0.043 – 0.052 USD/kWh โดยเมื่อเปรียบเทียบการประเมินต้นทุนพลังงานกับพื้นที่จังหวัดอุดรธานี ที่มีค่าต้นทุนพลังงานอยู่ที่ 0.079 USD/kWh (Tawinprai et al., 2023a) พบว่าศักยภาพพลังงานลมและคุณลักษณะของกังหันลมมีผลต่อต้นทุนพลังงาน

Table 2 The validation of the average wind speed between wind resource maps with the two wind masts

Elevation (m, AGL)	Measured (m/s)	Mesoscale (m/s)	M/P ratio of mesoscale (m/s)	PMRE ratio for mesoscale (%)
90	4.74	3.874	1.22	18.27%
150	5.02	4.152	1.21	17.29%

Table 3 The mechanical properties of the wind turbine generators. Source Adapted from Pierrot (2016, 2018a, 2018b, 2018c).

Wind turbine generator	Number of wind turbine	Cut-in speed (m/s)	Rate speed (m/s)	Cut-out Speed (m/s)	Rotor diameter (m)
G126-2.5 MW	4	2	12.5	27	128
G132-3.3 MW	3	2	10	25	132
G128-4.5 MW	2	2	10	25	128
G132-5.0 MW	2	2	11	25	132

Table 4 Annual wind frequency (hour/year)

Wind speed (m/s)	Banrai	Kulto	Saphonthong	Sapsithong	Thahinngom	Thamafaiwan
1	0	0	0	0	0	0
2	2119	0	67	0	0	0
3	5215	1251	3210	4273	2559	2278
4	1426	7509	5483	4487	6201	5869
5	0	0	0	0	0	613
Sum	8760	8760	8760	8760	8760	8760

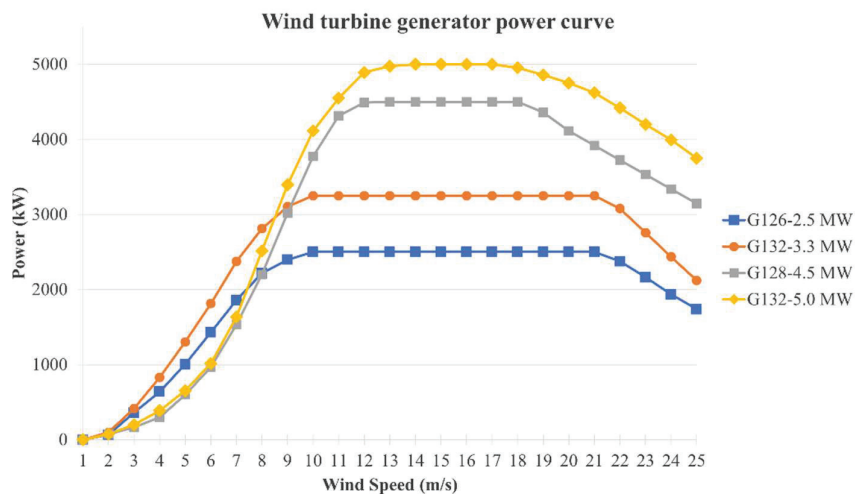


Figure 9 The power curve of chosen wind turbine generators.

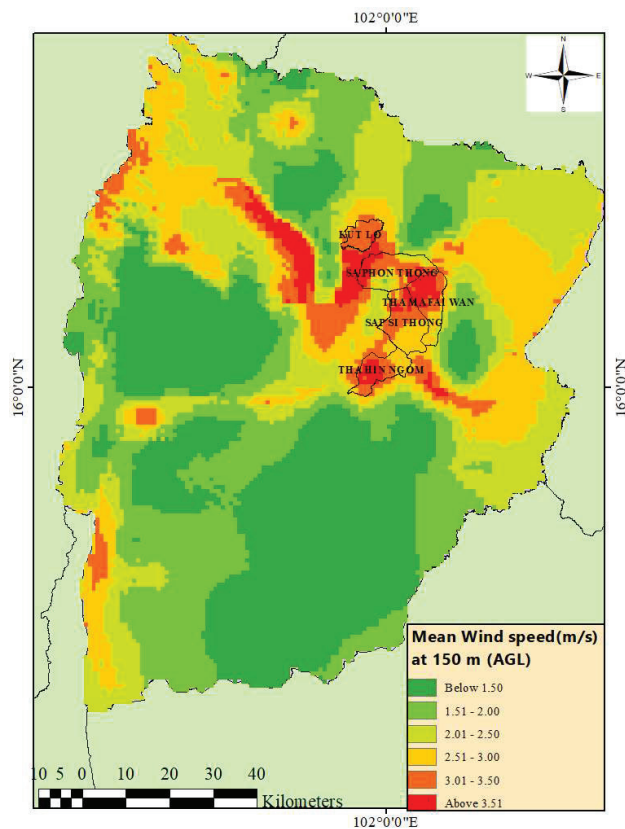


Figure 10 Sub-district with high wind energy potential

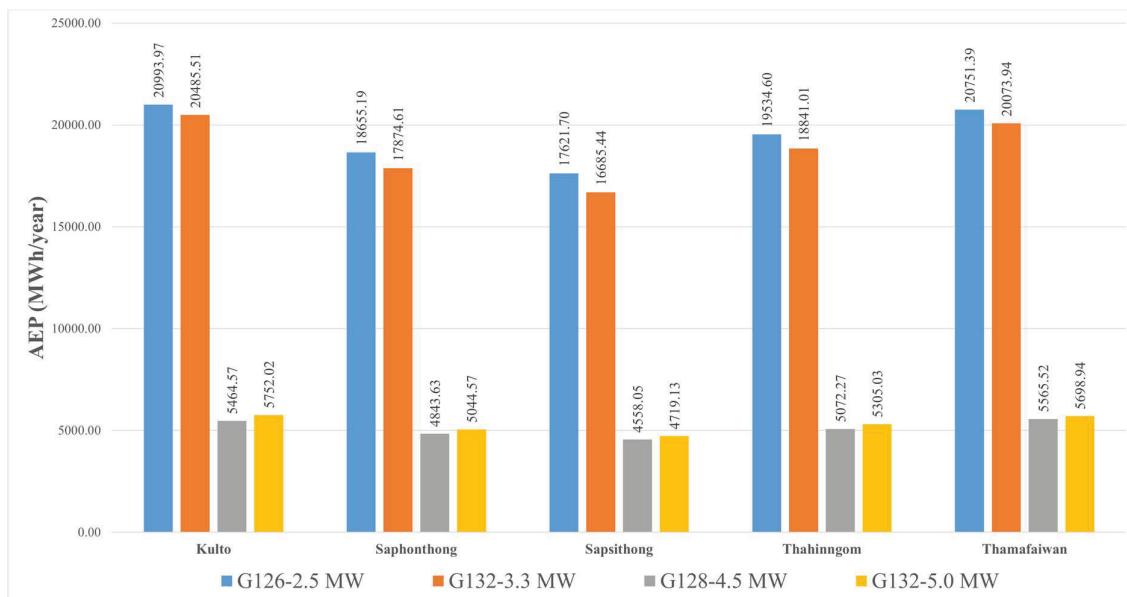


Figure 11 The annual energy production of each site under 10 MW Very Small Power Producer (VSPP) wind power plants.

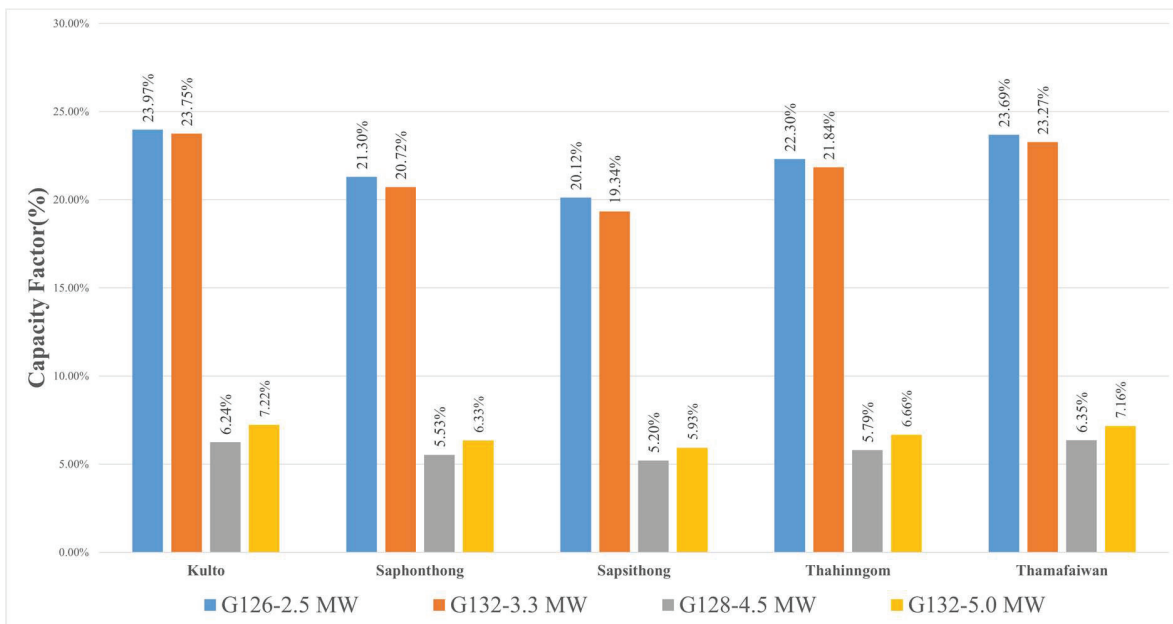


Figure 12 The capacity factor of each site under 10 MW Very Small Power Producer (VSPP) wind power plants.

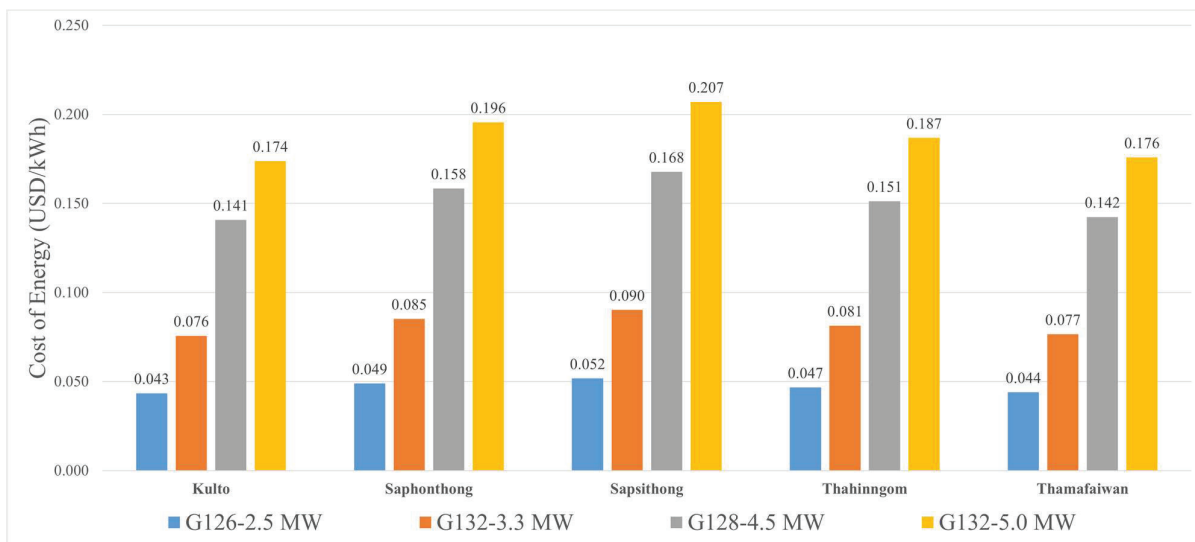


Figure 13 Energy costs for the probable sites under the VSPP 10 MW wind power projects.

สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยที่ดำเนินการในปัจจุบันนี้ได้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่จังหวัดชัยภูมินั้นมีภูมิประเทศที่มีทรัพยากรลมที่มีศักยภาพที่เพียงพอต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากลม จากการสร้างแผนที่ความเร็วลมในพื้นที่ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการกระจายของลมที่พบมากในที่ราบสูงบริเวณภูเขาและนอกเหนือจากฟาร์มกังหันลมส่วนใหญ่ที่ตั้งอยู่ใน อำเภอชัยใหญ่และ อำเภอเทพสถิต เป็นส่วนใหญ่ จากผลการจำลองของแผนที่ศักยภาพพลังงานลม แต่ยังมีพื้นที่อื่นที่มีศักยภาพเพียงพอสำหรับการติดตั้งฟาร์มกังหันลมเช่น 5 ตำบล

ที่กล่าวไปข้างต้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาแผนที่ทรัพยากรลมในจังหวัดชัยภูมิโดยใช้กริดที่มีความละเอียดสูงร่วมกับแบบจำลอง MC2 และ MS-micro ที่อยู่ใน WEST Toolkit สำหรับการสร้างแบบจำลองระดับเมโซและไมโครตามลำดับ ร่วมกับฐานข้อมูลอากาศ NCEP/FNL, ข้อมูลภูมิประเทศและข้อมูลการใช้ที่ดิน ผลการจำลองแผนที่ทรัพยากรลมที่ใช้กริดที่มีความละเอียด 200 เมตรแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ในจังหวัดชัยภูมิมีศักยภาพความเร็วลม (ความเร็วลมอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4.93 เมตรต่อวินาที) ทั้งหมด 5 พื้นที่ ได้แก่ ตำบลกุดละแวก, ตำบลท่ามะไฟหวาน, ตำบลชัยสทอง ตำบลสระโพนทองและตำบล

ทำหิโนนงาม จากความเร็วลมและความถี่ในการเกิดลมในพื้นที่ที่กล่าวมา ภายใต้นโยบายพลังงานลมของประเทศไทย ที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP 10 MW) สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 20,994 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี (MWh/year) โดยมีต้นทุนพลังงานประมาณต่ำสุดที่ 0.43 ดังนั้นการศึกษาและจัดทำแผนที่ทรัพยากรลมนี้สามารถนำไปใช้ประเมินทรัพยากรลมในท้องถิ่นพื้นที่อื่นได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้นเท่านั้นควรจะมีการประเมินแบบรายเดือนเพิ่มและควรมีการปรับปรุงโมเดลการไหลของลมโดยเพิ่มเงื่อนไขอื่น ๆ เช่น ทิศทางลม, ความแปรปรวนตามฤดูกาลและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม-สังคม ที่เกิดจากการติดตั้งกังหันลมของโครงการเพื่อประกอบการตัดสินใจสำหรับผู้ลงทุนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้ทุนวิจัย M.Eng. โครงการนักศึกษาภายใต้สัญญาเลขที่ M-Eng.-ME-001/2566 และขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จอมภพ แวตักดิ์ และทีมวิจัยศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณสำหรับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทำแผนที่ และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2566a). รายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือนมกราคม-กรกฎาคม 2566. <https://kc.dede.go.th/knowledge-view.aspx?p=505>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2566b). สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน. https://www.dede.go.th/articles?id=449&menu_id=1

กองนโยบายและแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2022). ข้อมูลสภาพการใช้ที่ดิน. <https://webapp.idd.go.th/lpd/LandUseInfor.php>

กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด สำนักงานจังหวัดชัยภูมิ. (2567, มกราคม 14). ข้อมูลจังหวัดชัยภูมิ. https://www.chaiyaphum.go.th/page_about/about1.php

Bank of Thailand. (2023). *Thailand's macroeconomic indicators*. <https://www.bot.or.th/th/home.html>

Deepo, W., Kongjeen, Y., & Plangklang, B. (2021). Performance analysis of an 18 MW wind farm in Nakhon Ratchasima Province. *Proceeding of the 2021 9th International Electrical Engineering Congress, IEECON 2021*, 121–124. <https://doi.org/10.1109/IEECON51072.2021.9440265>

Dominic, C. (2021, November 12). *Global net zero commitments*. <https://commonslibrary.parliament.uk/global-net-zero-commitments/>

EPPO. (2020). *Power development plan: PDP 2018 revision 1*. In *Energy Policy Plan*. <https://www.egat.co.th/home/egat-development-plan/>

Gasset, N., Landry, M., & Gagnon, Y. (2012). A comparison of wind flow models for wind resource assessment in wind energy applications. *Energies*, 5(11), 4288–4322. <https://doi.org/10.3390/en5114288>

Gibb, D., Ledanois, N., Ranalder, L., & Yaqoob, H. (2022). *Renewables 2022 global status report*. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>

IRENA. (2023). *Renewable power generation costs in 2020*. <https://www.irena.org>

Janjai, S., Masiri, I., Promsen, W., Pattarapanitchai, S., Pankaew, P., Laksanaboonsong, J., Bischoff-Gauss, I., & Kalthoff, N. (2014). Evaluation of wind energy potential over Thailand by using an atmospheric mesoscale model and a GIS approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.010>

Kim, B., Lee, K., Ko, K., & Choi, J. (2022). Offshore wind resource assessment off the coast of Daejeong, Jeju Island using 30-year wind estimates. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18447-7>

Martinez, A., & Iglesias, G. (2022). Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150580>

Mundu, M. M., Nnamchi, S. N., Ukagwu, K. J., Peter, B. A., Nnamchi, O. A., & Ssempewo, J. I. (2022). Numerical modelling of wind flow for solar power generation in a case study of the tropical zones. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4123–4134. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01343-w>

Pierrot, M. (2016). *Gamesa G126/2500*. In *Wind Power*. https://www.thewindpower.net/turbine_en_1088_gamesa_g126-2500.php

Pierrot, M. (2018a). *Gamesa G128/4500*. In *Wind Power*. https://www.thewindpower.net/turbine_en_81_gamesa_g128-4500.php

- Pierrot, M. (2018b). *Gamesa G132/3300*. In *Wind Power*. https://www.thewindpower.net/turbine_en_1105_gamesa_g132-3300.php
- Pierrot, M. (2018c). *Gamesa G132/5000*. In *Wind Power*. https://www.thewindpower.net/turbine_en_774_gamesa_g132-5000.php
- Polnumtiang, S., & Tangchaichit, K. (2022a). Potential wind power generation at Khon Kaen, Thailand. *Wind and Structures*. <https://doi.org/10.12989/was.2022.35.6.000>
- Polnumtiang, S., & Tangchaichit, K. (2022b). Wind energy resource assessment for Mukdahan, Thailand. *International Journal of Green Energy*, 19(2), 137–148. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1941039>
- Research Data Archive. (2023). *NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999*. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>
- Tawinprai, S., Polnumtiang, S., Suksomprom, P., Waewsak, J., & Tangchaichit, K. (2022). Modeling of wind energy potential using a high-resolution grid over Mekong riverside region in the northeastern part of Thailand. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(3–4), 1587–1604. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04235-w>
- Tawinprai, S., Polnumtiang, S., Suksomprom, P., Waewsak, J., & Tangchaichit, K. (2023a). A modelling approach for evaluating the wind resource and power generation using a high-resolution grid at selected regions in the northeast of Thailand. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01669-z>
- Tawinprai, S., Polnumtiang, S., Suksomprom, P., Waewsak, J., & Tangchaichit, K. (2023b). A modelling approach for evaluating the wind resource and power generation using a high-resolution grid at selected regions in the northeast of Thailand. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(3), 3229–3241. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01669-z>
- Waewsak, J., Landry, M., & Gagnon, Y. (2015). Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy*, 81, 609–626. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.069>

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม

Factors affecting tensile-shear strength properties of lap joints between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel using gas metal arc welding process

อมรศักดิ์ มาใหญ่¹, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ¹, พีรเดช สุวิทย์ารักษ์¹ และ วีระพล ทับทิมดี^{2*}

Amornsak Mayai¹, Narongsak Thammachot¹, Peeradaech Suwittayaruk¹ and Weerapol Taptimdee^{2*}

Received: 15 May 2024 ; Revised: 8 July 2024 ; Accepted: 13 August 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยใช้กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมลง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม โดยพิจารณาถึงปัจจัยการเชื่อม 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (120, 140 และ 160 แอมแปร์) และความเร็วในการเชื่อม (200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที) โดยใช้การออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอิทธิพลของปัจจัยหลักและอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง ผลการวิจัยพบว่า กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง เมื่อเชื่อมด้วยความเร็วในการเชื่อมคงที่ กระแสไฟเชื่อมสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นและรอยเชื่อมกว้างขึ้น เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลงและรอยเชื่อมแคบลง ผลของค่ามุมตัดเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟสูงขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ส่งผลให้มุมตัดเฉื่อยเพิ่มขึ้นและเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมตัดเฉื่อยลดลง เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุด

คำสำคัญ: รอยต่อเกย, สมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึง, กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม, เหล็กกล้าคาร์บอน SS400, เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

Abstract

This research aims to study the factors affecting the tensile-shear strength of lap joints between SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel welded using the gas metal arc welding process (GMAW) in the vertical down position with a welding robot arm. The experimental variables include three welding parameters, each with three levels: welding current (120, 140, and 160 amperes) and welding speed (200, 250, and 300 millimeters per minute). A full factorial design was employed to analyze the data variance, main effect, and interaction effects on shear-tensile strength. The results demonstrate that welding current and welding speed had a significant influence on the shear-tensile strength of the lap joints. When welding at a constant speed, increasing the welding current resulted in higher tensile-shear strength and a wider weld bead size. However, increasing the welding speed led to a decrease in tensile-shear strength and narrower weld beads. The trend of the average bent angle was consistent with that of the tensile-shear strength. When welding at a constant welding speed, a higher welding current resulted in a higher bend angle average, while increasing the welding speed lowered the bend angle average. A welding current of 160 A and 200 mm/min speed yielded the highest tensile-shear strength.

Keywords: Lab joints, tensile-shear strength, gas metal arc welding process, SS400 carbon steel, SUS304 stainless steel.

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang, Chachoengsao 24000

* Corresponding author: Weerapol Taptimdee E-mail: weerapol@techno.rru.ac.th

บทนำ

การเชื่อมถือเป็นเทคนิคการต่อโลหะที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่อุตสาหกรรมการก่อสร้างไปจนถึงอุตสาหกรรมการผลิต โดยการเชื่อมทำหน้าที่หลักในการต่อวัสดุเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ในปัจจุบันการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม (Welding robot arm) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในอุตสาหกรรมการต่อเรือ (Lee, 2014), การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในการเชื่อมถังแรงดันสูงในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Vosniakos *et al.*, 2022), การใช้แขนหุ่นยนต์เชื่อมในอุตสาหกรรมการยานยนต์ในการเชื่อมตัวถังและชิ้นส่วน (Thakare, 2018) เป็นต้น แขนหุ่นยนต์เชื่อมมีประสิทธิภาพที่ดีทั้งในด้านการรักษาความสม่ำเสมอของคุณภาพการเชื่อม การรักษาความต่อเนื่องและการทำงานซ้ำๆ ทำให้มั่นใจได้ถึงผลของรอยเชื่อมที่แม่นยำ (Wang *et al.*, 2021)

การเชื่อมโลหะต่างชนิดกันเป็นงานที่ซับซ้อนเนื่องจากมีความแตกต่างกันด้านองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และคุณลักษณะทางโลหะวิทยา สมบัติเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างโดยรวมและความน่าเชื่อถือของการเชื่อม จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาที่มีการศึกษาถึงการนำโลหะต่างชนิดกันมาต่อกันโดยการเชื่อมและศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อแนวเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ในการนำโลหะต่างชนิดมาเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยกระบวนการเชื่อมในรูปแบบต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (FSW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และทองแดง (Tanmay & Panda, 2023) การเชื่อมโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม 304L และเหล็กกล้าไร้สนิม 403 (Khan *et al.*, 2021) การเชื่อมอาร์คทังสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW) ต่อชนทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม 316L (Jahanzeb *et al.*, 2017) การเชื่อมด้วย

พลาสมา (PAW) ต่อเกย ทำราบ ระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Purnama & Oktadinata, 2019) เป็นต้น เห็นได้ว่า มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าคาร์บอนมาเชื่อมต่อกับโลหะต่างชนิดกันด้วยกระบวนการเชื่อมทำเชื่อม และการต่อที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงกระบวนการเชื่อมต่อเกย ทำตั้งของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการเชื่อม GMAW ที่เชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อมยังมีไม่มากนัก เนื่องจากการเชื่อมทำตั้งต้องคำนึงถึงแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำกับน้ำโลหะเหลวไหลลงสู่ด้านล่าง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมได้ ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่องานเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความเร็วลวดเชื่อม เป็นต้น เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพทั้งทางกายภาพ ทางกลและโครงสร้างจุลภาค

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมล่ง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยเชื่อมสำหรับวัสดุต่างชนิดกัน

วิธีดำเนินงานวิจัย

วัสดุและคุณสมบัติ

วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก SUS304 และลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อม คือ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ER309L ตามมาตรฐาน AWS A5.9 ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทั้ง 3 ชนิดด้วยเครื่อง Emission spectrometer (ยี่ห้อ Amarex รุ่น Spectromaxx) ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี แสดงดัง Table 1

Table 1 Chemical compositions of materials and electrodes used in the study.

materials and electrodes	Chemical compositions (%)									
	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Si	Mo	Ni	Cu
SS400	0.051	0.047	0.116	0.542	0.012	0.014	-	0.009	0.047	0.179
SUS304	18.513	7.983	0.078	1.763	0.021	0.008	-	0.235	7.983	0.306
ER309L	24.5	13.0	0.025	1.88	0.02	0.01	0.40	0.35	0.10	0.35

การเตรียมชิ้นงานและปัจจัยการทดลอง

เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 และเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ความหนา 3 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีขนาด 100 × 200 มิลลิเมตร วัสดุทั้งสองชนิดนำมาต่อเกยกันโดย SUS304 วางทับบน SS400 โดยกำหนดให้มีระยะเกยของโลหะเชื่อมเท่ากับ 30 มิลลิเมตร (ASTM D 1002-99) ทำการเชื่อมด้านเดียว ด้วยกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ในท่าตั้ง เชื่อมลง มุมในการเดินแนวเชื่อมเท่ากับ 45 องศา ควบคุมการเชื่อมด้วยแขนหุ่นยนต์เชื่อม (ยี่ห้อ Panasonic รุ่น VR-006) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER309L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ใช้แก๊สอาร์กอน (99.99% Ar) ในการปกคลุมแนวเชื่อม อัตราการไหลของแก๊ส 12 ลิตร/นาที ลักษณะการต่อเกยและทิศทางการเดินแนวเชื่อม แสดงดัง Figure 1

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ค่ากระแสไฟเชื่อม (120, 140 และ 160 แอมแปร์) และความเร็วในการเชื่อม (200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที) จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองระดับปัจจัยละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 45 ตัวอย่าง

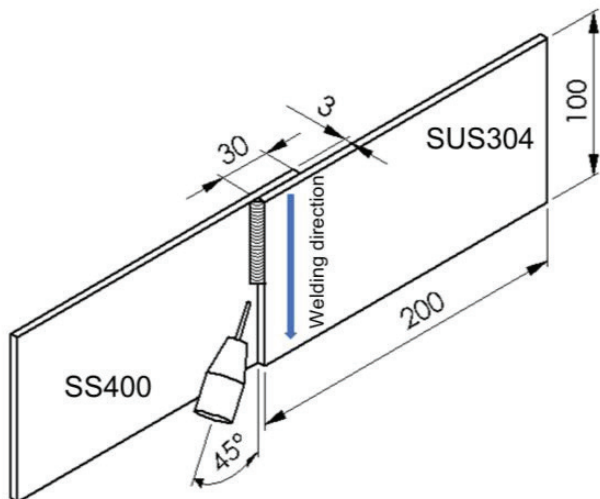


Figure 1 The characteristics of the lap joint and the welding direction.

การทดสอบลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม ความแข็งแรงเฉือน-ดึงและมุมตัด

หลังการเชื่อม ชิ้นงานตัวอย่างถูกนำมาตรวจสอบลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยสายตา (Visual test) ได้แก่ เกล็ดของแนวเชื่อม และขนาดแนวเชื่อม เป็นต้น จากนั้นจึงเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้เป็นชิ้นทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึง โดยตัดบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวเชื่อมทั้งและชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงเฉือน-ดึงถูกตัดบริเวณพื้นที่ถัดมา

แสดงดัง Figure 2 ชิ้นทดสอบถูกตัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC ให้มีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตรและยาว 170 มิลลิเมตร จากนั้นเพื่อจำกัดความเสียหายให้เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณแนวเชื่อมเท่านั้น จึงได้นำชิ้นทดสอบมาทำการกัดบริเวณด้านข้างแนวเชื่อมเพื่อกำหนดรอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบ ที่ต้องเตรียมชิ้นทดสอบเช่นนี้เนื่องจากเมื่อชิ้นทดสอบรับแรงเฉือน-ดึง ตำแหน่งของความเสียหายจะเกิดขึ้นบนโลหะฐานซึ่งอยู่ห่างจากบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งกลไกการฉีกขาดของโลหะฐานเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดความเสียหายที่เนื้อเชื่อม สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณเนื้อเชื่อมและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน มีความแข็งแรงสูงกว่าโลหะฐาน (Amodeo et al., 2014) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเตรียมชิ้นทดสอบโดยกัดบริเวณด้านข้างรอยเชื่อม ดัง Figure 3 การทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึงดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1002-99 (American Society for Testing and Materials, 1999) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal testing machine ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LB100 plus) การจับชิ้นงานทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ แสดงดัง Figure 4 (a) จากนั้นจึงทำการวัดมุมตัดของชิ้นทดสอบด้วยไม้วัดมุม (Kimapong & Triwanapong, 2018) แสดงดัง Figure 4 (b)

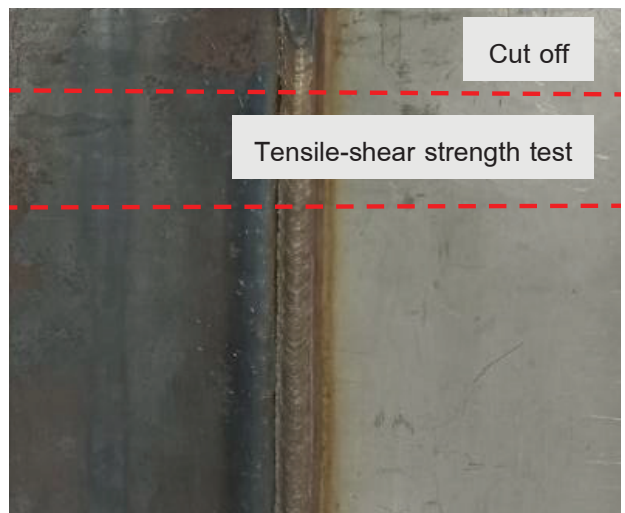


Figure 2 Specimen cutting positions.

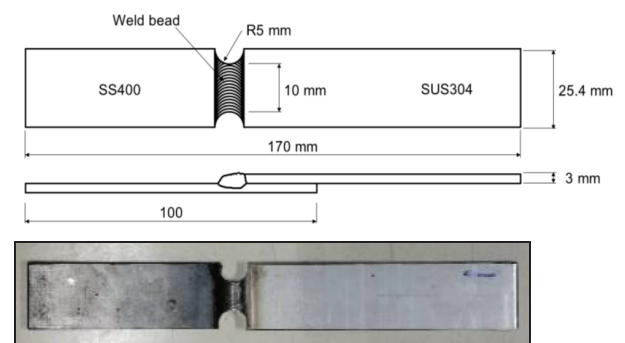


Figure 3 Preparation specimen of a tensile-shear strength test according to the ASTM D1002 – 99 standards.

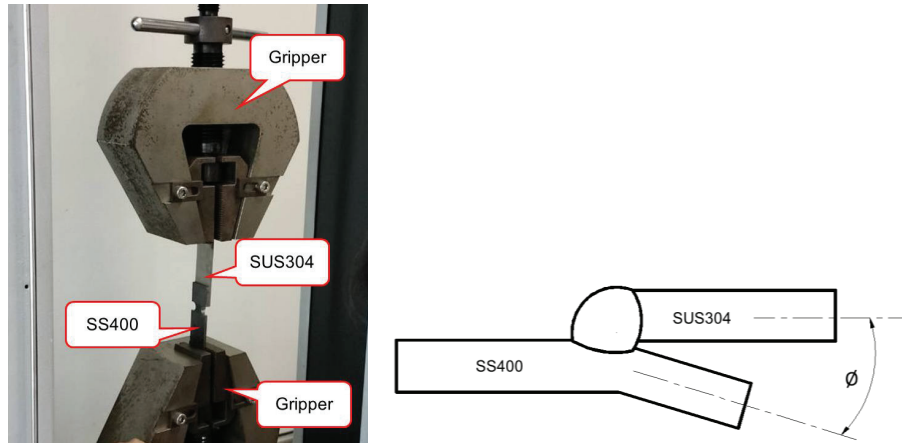


Figure 4 (a) tensile-shear strength test on universal testing machine (b) Bent angle measurement.

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลและอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนดึง ด้วยวิธีการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเพื่อยืนยันสมมติฐานในการทดลองว่าผลกระทบของกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงเฉือนดึงของแนวเชื่อมหรือไม่ กำหนดระดับนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ผลการวิจัย

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม

ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมหลังการเชื่อมนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้กระแสไฟเชื่อมคงที่ 140 แอมแปร์ และกำหนดความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกันดัง Figure 5 และเลือกความเร็วในการเชื่อม 250 มิลลิเมตรต่อ นาที และปรับกระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกัน ดัง Figure 6 ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนของตัวแปรทั้งสองชนิดเนื่องจากเป็นค่ากลางของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้

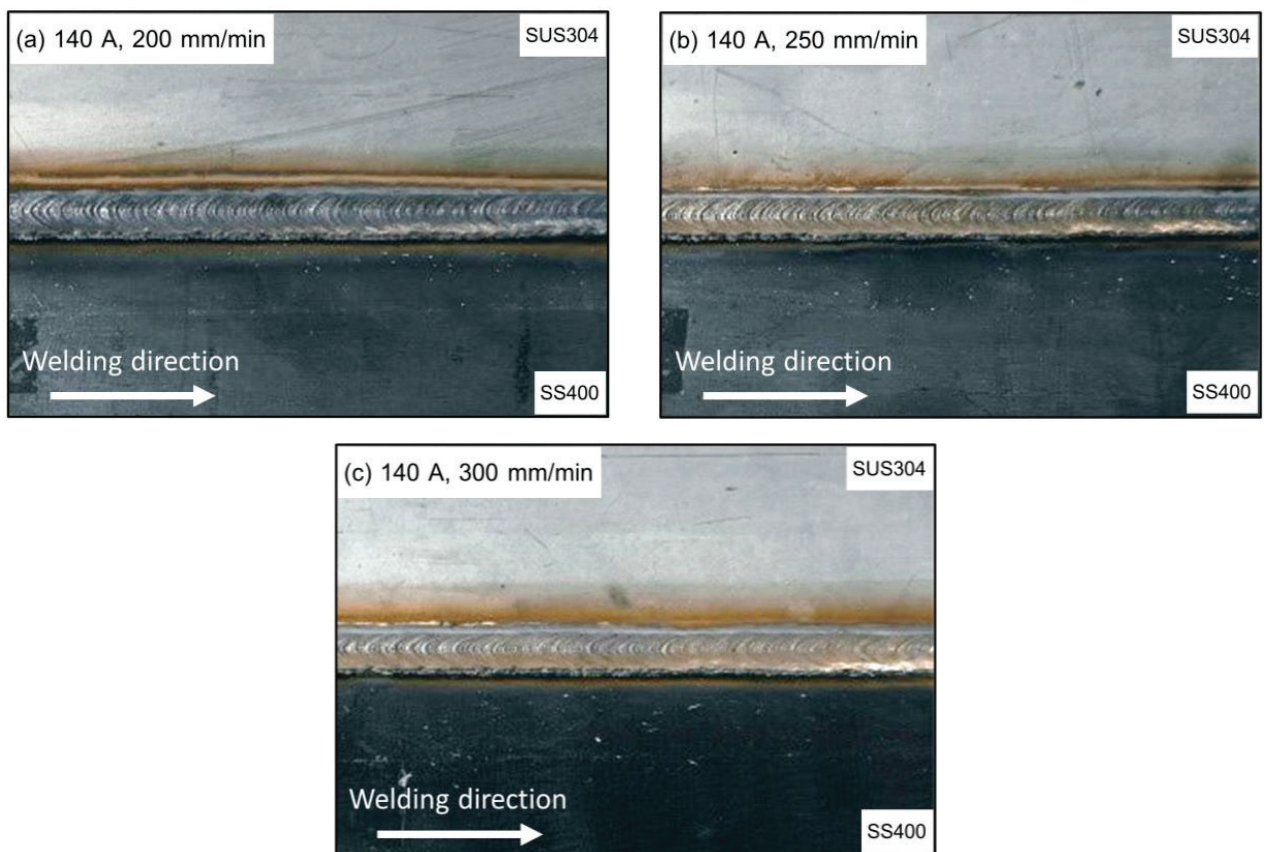


Figure 5 Surface characteristics of the weld seam at a welding current of 140 A and the welding speeds of (a) 200 mm/min, (b) 250 mm/min, and (c) 300 mm/min.

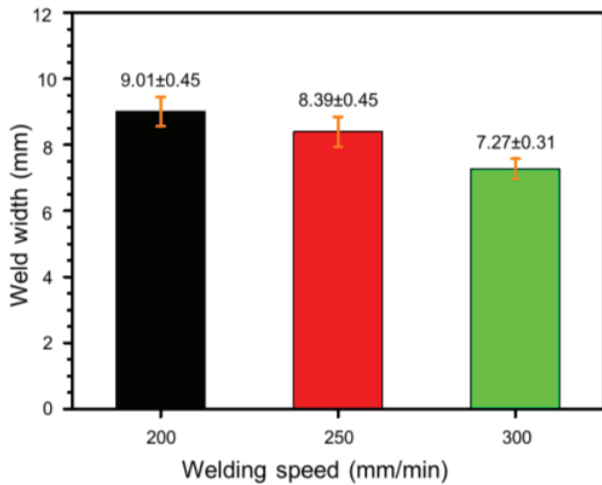


Figure 6 Weld width when using a welding current of 140 A and the welding speeds of 200, 250 and 300 mm/min.

Figure 5 แสดงลักษณะผิวหน้าของรอยเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200, 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าแนวเชื่อมทั้งหมดมีความสมบูรณ์ ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 5 (a)) เกล็ดของแนวเชื่อมละเอียดและมีความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ยที่ 9.01 มิลลิเมตร (Figure 6) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการเชื่อมให้สูงขึ้นจาก 200 มิลลิเมตรต่อนาที เป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 5 (b, c)) พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เกล็ดของแนวเชื่อมหยาบขึ้นและขนาดแนวเชื่อมแคบลง โดยมีขนาดความกว้างของแนวเชื่อมเฉลี่ยลดลงเป็น 8.39 และ 7.27 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Figure 6) ผลนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้หยดของน้ำโลหะหลอมเหลวสะสมจากจุดเชื่อมเดิมลงในแนวเชื่อมได้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ความกว้างของแนวเชื่อมลดลง (Kumar *et al.*, 2021; Panda *et al.*, 2019)

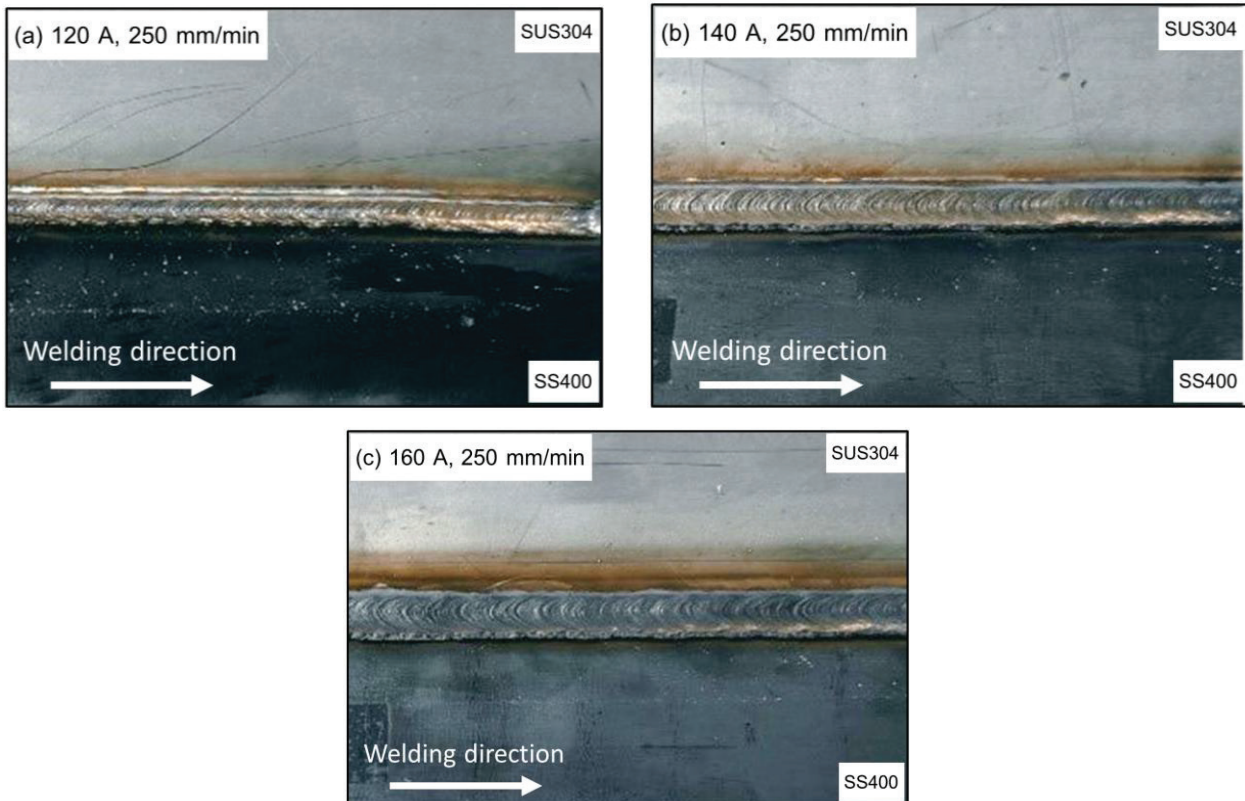


Figure 7 Surface characteristics of the weld seam on a welding speed of 250 mm/min and the welding current of (a) 120 A, (b) 140 A, and (c) 160 A.

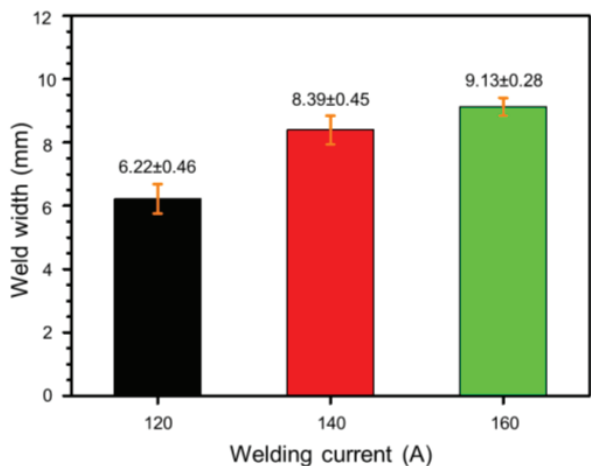


Figure 8 Width of weld seam when using a welding speed of 250 mm/min on the welding currents of 120, 140 and 160 A.

Figure 7 แสดงลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120, 140 และ 160 แอมแปร์ ผลแสดงให้เห็นว่า แนวเชื่อมทั้งหมดมีความสมบูรณ์ไม่พบความไม่ต่อเนื่องบนแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ ดัง Figure 7 (a) พบว่า เกิดคของแนวเชื่อมหยาบและมีขนาดของแนวเชื่อมที่ค่อนข้างแคบ โดยมีขนาดแนวเชื่อมเท่ากับ 6.22 มิลลิเมตร (Figure 8) เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้นเป็น 140 และ 160 แอมแปร์ พบว่า ขนาดของแนวเชื่อมมีขนาดที่กว้างขึ้น โดยมีขนาดแนวเชื่อมเท่ากับ 8.39 และ 9.13 มิลลิเมตร ตามลำดับ (Figure 8) การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟเชื่อมแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อความกว้างของรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น หยดน้ำโลหะหลอมเหลวขนาดใหญ่ก็สะสมตัว จากนั้นจึงตกลงมาสะสมในแนวเชื่อมในขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่ จึงทำให้ความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น (Pan *et al.*, 2018; Pathak *et al.*, 2021)

ผลการทดสอบแรงเฉือน-ดึงและมุ่มดัด

ผลการทดสอบแรงเฉือน-ดึงของชิ้นงานทดสอบ และกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงเฉือน-ดึงเมื่อกระแสไฟและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน แสดงดัง Table 2 และ Figure 9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเชื่อมด้วยกระแสไฟที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการเชื่อมที่เท่ากัน ดัง Figure 9 (a) เมื่อเชื่อมด้วยความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที กระแสไฟ 120 แอมแปร์ ค่าแรงเฉือน-ดึงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 297.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และเมื่อกระแสไฟเพิ่มขึ้นเป็น 140 และ 160 แอมแปร์ ค่าแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นเป็น 481.6 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 516.3 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกระแส

ไฟที่ 120 แอมแปร์กับ 160 แอมแปร์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก กระแสไฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนในการหลอมละลายของเนื้อโลหะทั้งสองชนิดและเนื้อโลหะจากลวดเชื่อมสามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้น (Vora *et al.*, 2022) จึงทำให้ความแข็งแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการเชื่อมที่มีต่อความแข็งแรงเฉือน-ดึง ดัง Figure 9 (b) แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลงเมื่อเชื่อมกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงมีค่าเฉลี่ย 297.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยมีค่า 288.8 และ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการป้อนลวดเชื่อมลดลงหรือเนื้อโลหะที่ละลายจากลวดเชื่อมลดลงทำให้เนื้อโลหะบริเวณแนวเชื่อมลดลง ดังนั้นพื้นที่ในการรับแรงเฉือน-ดึงจึงลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงเฉือน-ดึงลดลงไปด้วย (Rakesh *et al.*, 2022)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุด พบว่า ที่กระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่กระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

ผลของมุ่มดัดเมื่อกระแสเชื่อมและความเร็วเปลี่ยนแปลงไป ดัง Figure 10 พบว่า ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือ เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้มุ่มดัดเฉลี่ยลดลง (Figure 10 (a)) เช่น เมื่อเชื่อมด้วยกระแส 120 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.3 องศา เมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 300 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยลดลงเป็น 11.4 และ 8.2 องศา ตามลำดับ เมื่อกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้มุ่มดัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น (Figure 10 (b)) เช่น เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่ามุ่มดัดเฉลี่ยอยู่ที่ 13.3 องศา ในขณะที่กระแสไฟ 140 และ 160 แอมแปร์ ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 29.4 องศาและ 38.2 องศา ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสไฟที่เพิ่มขึ้นทำให้ความร้อนในการหลอมละลายสูงขึ้น เนื้อโลหะที่แนวเชื่อมหลอมละลายเข้ากันได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ในขณะที่ผลของความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุ่มดัดเฉลี่ยลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกับการลดลงของความแข็งแรงเฉือน-ดึงที่กล่าวมาข้างต้น

ตำแหน่งการฉีกขาดของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากทดสอบความแข็งแรงเฉือน-ดึง แสดงดัง Figure 11 แสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งการฉีกขาดของตัวอย่างเริ่มต้นในบริเวณใกล้เคียงกับจุดตัดพร้อมกันของ SS400, เนื้อเชื่อมและ SUS304 เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นจุดศูนย์รวมของความเค้น จึงทำให้ความต้านทานการแตกหักของรอยต่อลดลง (Hasanniah & Movahedi, 2019; Ye *et al.*, 2017) และการฉีกขาดขยายตัวต่อเนื่องไปในบริเวณเนื้อเชื่อมจนถึงผิวด้านนอกของ SUS304

เมื่อพิจารณาลักษณะการฉีกขาดของชิ้นงานตัวอย่างที่ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดและต่ำสุด แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการฉีกขาดของตัวอย่างทั้งสองแตกต่างกัน โดยชิ้นงานตัวอย่างที่เชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า การหลอมละลายของแนวเชื่อมสมบูรณ์และรอยฉีกขาดจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งแตกต่างจากรอยฉีกขาดของตัวอย่างที่เชื่อมด้วย

กระแสไฟเชื่อม 120 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า การหลอมละลายของแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์และรอยฉีกขาดจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากกระแสไฟเชื่อมที่ต่ำและความเร็วในการเชื่อมสูงส่งผลให้ความร้อนเกิดขึ้นที่บ่อหลอมละลายไม่เพียงพอจึงเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือน-ดึงลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของจูล นั่นคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงตามกระแสและเวลา (Thakur & Chapgaon, 2016) และลักษณะของรอยฉีกขาดนั้น Kimapong and Triwanapong (2018) ได้กล่าวว่า ทิศทางการฉีกขาดของรอยเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงจะต้องตั้งฉากกับทิศทางของแนวแรง และผลจากมุมตัดที่มากขึ้นอาจช่วยถ่ายเทพลังงานให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือน-ดึงสูงขึ้น

Table 2 Tensile-shear strength results on different welding currents and speeds.

Current (A)	Speed (mm/min)	Tensile shear strength (N/mm ²)					Average TSS (N/mm ²)	Average bent angle (Degree)
		Sample						
		1	2	3	4	5		
120	200	283.6	219.1	303.9	343.9	337.0	297.5±50.3	13.2±1.3
	250	299.4	416.5	244.9	255.0	228.5	288.8±76.0	11.4±1.5
	300	345.2	274.2	310.9	211.5	253.2	279.0±51.6	8.2±1.5
140	200	466.4	503.8	510.1	425.7	502.2	481.6±35.7	29.4±1.7
	250	508.2	436.3	461.3	492.2	476.2	474.8±27.8	27.8±2.5
	300	460.4	480.9	381.7	384.4	475.1	436.5±49.4	24.8±1.5
160	200	533.0	472.9	521.7	466.4	516.3	502.1±30.3	38.2±2.9
	250	498.5	441.1	491.2	495.7	524.5	490.2±30.4	36.0±2.6
	300	477.4	461.3	438.6	399.2	440.4	443.4±29.4	31.6±2.1

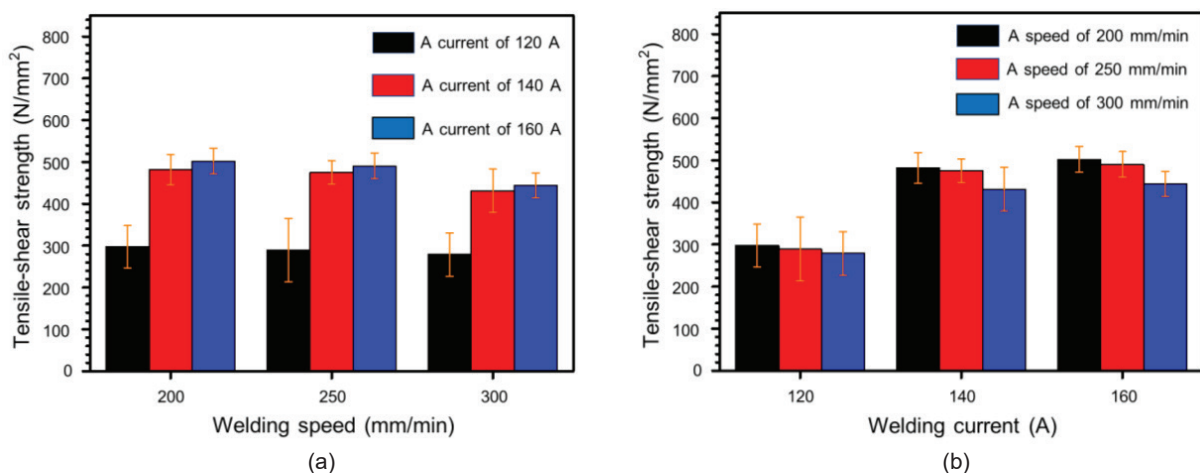


Figure 9 The result of tensile-shear strength on (a) welding speed and (b) welding current.

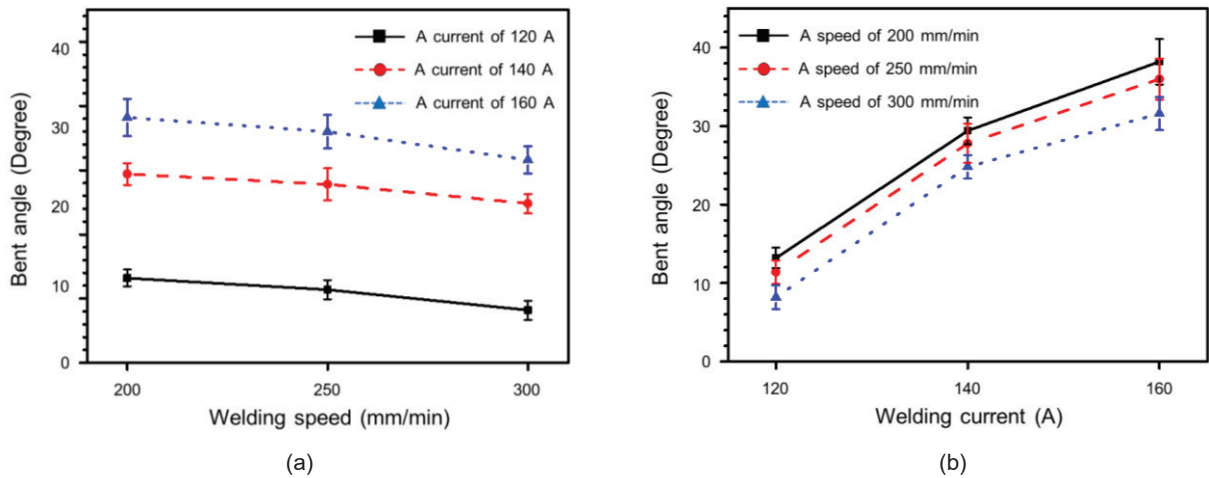


Figure 10 The result of bent angle on (a) welding speed and (b) welding current.

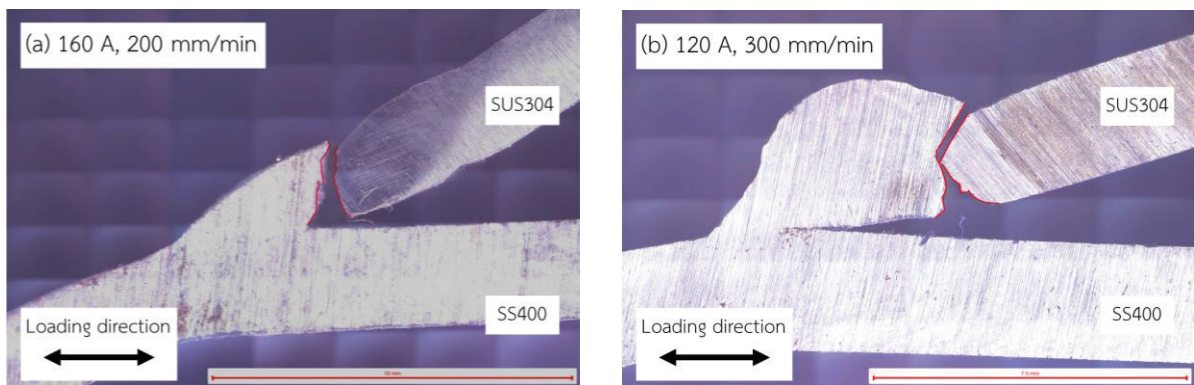


Figure 11 Fracture positions of specimens at different welding currents and speeds: (a) 120 A, 300 mm/min, and (b) 160 A, 200 mm/min.

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เพื่อยืนยันสมมติฐานงานวิจัย จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่รับจากการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ การวิเคราะห์ความแปรปรวน ในการพิจารณาข้อกำหนดในการวิเคราะห์เบื้องต้น ค่า Residual ต้องผ่านการทดสอบ 3 ข้อดังนี้

1. ค่า Residual มีการแจกแจงปกติ
2. ค่าความแปรปรวนของ Residual ของแต่ละปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม มีค่าเท่ากัน

3. ค่า Residual มีความอิสระต่อกัน

ผลที่ได้จากการนำค่า Residual ในการทดสอบข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อ พบว่ามี 1 ข้อที่ไม่ผ่านข้อกำหนด ได้แก่ ค่าความแปรปรวนของ Residual ของกระแสไฟเชื่อมมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้ไม่สามารถนำค่าทางสถิติที่ได้รับมาวิเคราะห์ต่อได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลผ่านกราฟแสดงอิทธิพลหลักและกราฟแสดงอิทธิพลร่วม ดังแสดงใน Figure 12(a) และ Figure 12(b) ตามลำดับ

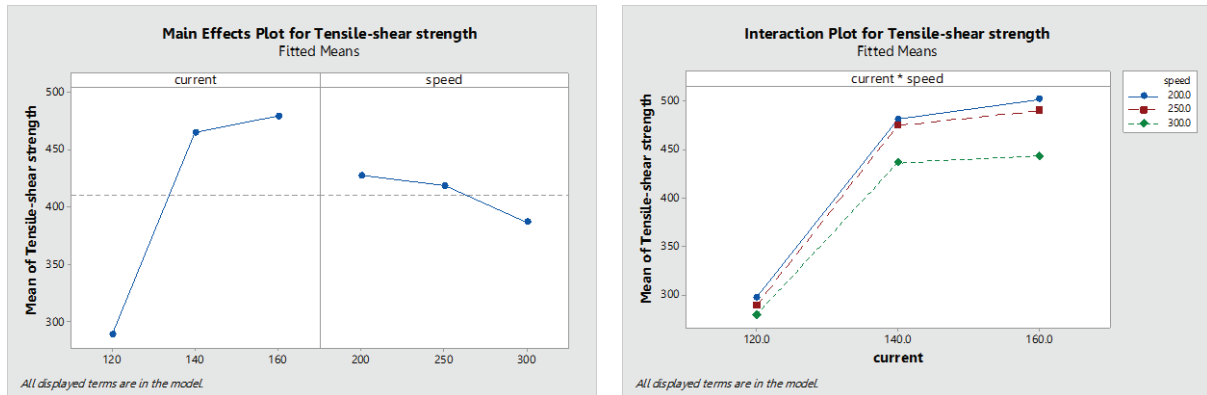


Figure 12 (a) Main effect and (b) Interaction plot of tensile-shear strength.

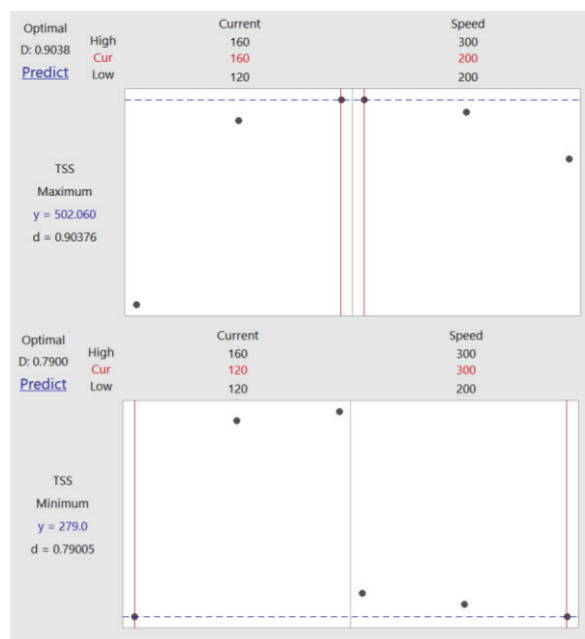


Figure 13 (a) Optimization plots for maximum and (b) minimum of tensile-shear strength.

จาก Figure 12 (a) แสดงอิทธิพลหลัก (Main effect) ของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึง เมื่อพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึง ทั้ง 2 ปัจจัย คือ กระแสไฟและความเร็วในการเชื่อม จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสไฟและความเร็วที่ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดคือ เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที

จาก Figure 12 (b) แสดงอิทธิพลร่วม (Interaction plot) ระหว่างค่ากระแสไฟและความเร็วในการเชื่อม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงจะมีค่าต่ำในทุกๆ ความเร็วในการเชื่อม แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้สูงขึ้น ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเฉือน-ดึงจะมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ ความเร็วในการเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม

200 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงสูงสุดที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงต่ำสุดที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้รับจากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับค่าความแข็งแรงเฉือนสูงสุดและต่ำสุด ดังแสดงในรูป Figure 13 (a) และ Figure 13 (b) ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยต่อเกยระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 กับเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 ในกระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สคลุม ทำตั้ง เชื่อมลง ควบคุมการเชื่อมด้วยแขน

หุ่นยนต์เชื่อม โดยพิจารณาถึงปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ผลการทดลองสรุปดังนี้

1. เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ พบว่า ความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเฉือน-ดึงเพิ่มขึ้น

2. เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมคงที่ ความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น พบว่า ความกว้างของรอยเชื่อมลดลง และความแข็งแรงเฉือน-ดึงของรอยเชื่อมลดลง

3. ค่ามุมตัดเฉื่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับความแข็งแรงเฉือน-ดึง กล่าวคือเมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมคงที่ ส่งผลให้มุมตัดเฉื่อยเพิ่มขึ้นและเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามุมตัดเฉื่อยลดลง

4. ปัจจัยด้านกระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุด คือ การเชื่อมด้วยกระแสไฟ 160 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 200 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 502.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงเฉือน-ดึงเฉลี่ยต่ำสุดที่ 279.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเชื่อมด้วยกระแสไฟ 120 แอมแปร์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Amodeo, C. M., Lai, W. J., Lee, J., & Pan, J. (2014). Failure modes of gas metal arc welds in lap-shear specimens of high strength low alloy (HSLA) steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 131, 74–99. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.07.009>

American Society for Testing and Materials. (1999). *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)* (ASTM D1002-99). ASTM International.

Hasanniah, A., & Movahedi, M. (2019). Gas tungsten arc lap welding of aluminum/steel hybrid structures. *Marine Structures*, 64, 295–304. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.11.013>

Jahanzeb, N., Shin, J. H., Singh, J., Heo, Y. U., & Choi, S. H. (2017). Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.002>

Khan, M., Dewan, M. W., & Sarkar, M. Z. (2021). Effects of welding technique, filler metal and post-weld heat treatment on stainless steel and mild steel dissimilar welding joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1307–1321. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.058>

Kimapong, K., & Triwanapong, S. (2018). Influence of gas metal arc welding parameter on lap joint properties of SS400 carbon steel and SUS304 stainless steel. *Key Engineering Materials*, 789, 110–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.789.110>

Kumar, V., Mandal, A., Das, A. K., & Kumar, S. (2021). Parametric study and characterization of wire arc additive manufactured steel structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5–6), 1723–1733. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07261-6>

Lee, D. (2014). Robots in the shipbuilding industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(5), 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.02.002>

Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J. (2018). Arc welding processes for additive manufacturing: A review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2, 3–24. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1

Panda, B., Shankhwar, K., Garg, A., & Savalani, M. M. (2019). Evaluation of genetic programming-based models for simulating bead dimensions in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 809–820. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1282-2>

Pathak, D., Pratap Singh, R., Gaur, S., & Balu, V. (2021). To study the influence of process parameters on weld bead geometry in shielded metal arc welding. *Materials Today: Proceedings*, 44, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.164>

- Purnama, D., & Oktadinata, H. (2019). Effect of shielding gas and filler metal to microstructure of dissimilar welded joint between austenitic stainless steel and low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 547(1), Article 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/547/1/012003>
- Rakesh, C., Heet, P., Jay, V., & Vivek, P. (2022). Parametric study and investigations of bead geometries of GMAW-based wire-arc additive manufacturing of 316L stainless steels. *Metals*, 12(8), Article 1232. <https://doi.org/10.3390/met12081232>
- Tanmay, & Panda, S. S. (2023). Microstructure and mechanical characterization of stainless steel and copper joint by metallurgical modification in GTAW process. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 54(3), 1010–1023. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-06964-7>
- Thakare, Y. A., & Upadhyay, P. (2018). Study on robotic manufacturing for automobile. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT)*, 2018: i-MESCON 18, 227–229.
- Thakur, P. P., & Chapgaon, A. N. (2016). A review on effects of GTAW process parameters on weld. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 4(1), 136–140. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11535.38569>
- Vora, J., Parikh, N., Chaudhari, R., Patel, V. K., Paramar, H., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022). Optimization of bead morphology for GMAW-based wire-arc additive manufacturing of 2.25 Cr-1.0 Mo steel using metal-cored wires. *Applied Sciences*, 12(10), Article 5060. <https://doi.org/10.3390/app12105060>
- Vosniakos, G. C., Katsaros, P., Papagiannoulis, I., & Meristoudi, E. (2022). Development of robotic welding stations for pressure vessels: Interactive digital manufacturing approaches. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(1), 151–166. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00813-w>
- Wang, X., Zhou, X., Xia, Z., & Gu, X. (2021). A survey of welding robot intelligent path optimization. *Journal of Manufacturing Processes*, 63, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.085>
- Ye, Z., Huang, J., Cheng, Z., Gao, W., Zhang, Y., Chen, S., & Yang, J. (2017). Combined effects of MIG and TIG arcs on weld appearance and interface properties in Al/steel double-sided butt welding-brazing. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.003>

สมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมรังไหม

Mechanical properties and biodegradation of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

กนกอร นุ้ยเล็ก¹, ณัฐกฤตา ประเสริฐโสภา¹ และ อิงอร สิทธิธนาดล^{2*}
Kanokon Nuilek¹, Natkrita Prasetsopha¹ and Ing-orn Sittitanadol^{2*}

Received: 24 May 2024 ; Revised: 15 July 2024 ; Accepted: 30 July 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยทำการเตรียมวัสดุคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมรังไหมในอัตราส่วนเท่ากับ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล (ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทก ความแข็ง) สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเติมรังไหมในปริมาณมากขึ้น ค่ามอดูลัสของยัง ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง การศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังกลบในดิน เป็นเวลา 4, 8 และ 10 สัปดาห์ พบว่าการเพิ่มปริมาณรังไหมในการผสมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดีขึ้น ในขณะที่การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานภายหลังทดสอบความต้านทานแรงกระแทก พบว่ามีการกระจายตัวของเส้นใยรังไหมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และมีความไม่เข้ากันระหว่างผิวของรังไหมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, รังไหม, วัสดุผสม, การย่อยสลายทางชีวภาพ, สมบัติเชิงกล

Abstract

In this study, poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites were prepared in the following ratios: 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40. The mechanical properties (tensile, impact, and hardness tests), biodegradation properties, and morphological characteristics of the composites were examined. The results demonstrated that the Young's modulus, impact strength, and hardness of the composites increased with an increase in the amount of silkworm cocoon, while the tensile strength and elongation at break of the composites decreased. An assessment of the decomposition of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites buried in soil for 4, 8, and 10 weeks showed that increasing the amount of silkworm cocoons in the composites resulted in increased biodegradation. Moreover, the morphology of the specimen after impact testing was examined using the SEM technique. The SEM images showed that the silkworm cocoon fibers were distributed in the polymer matrix, indicating the incompatibility of the silk and poly(butylene succinate) matrix. This incompatibility resulted in composite materials with decreased tensile strength and elongation at break.

Keywords: Poly(butylene succinate), Silkworm cocoon, Composites, Biodegradation, Mechanical properties

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น 40000

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

² Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000, Thailand.

* Corresponding author: ingorn.si@rmuti.ac.th

Introduction

Many countries currently recognize the importance of addressing various environmental problems. The demand for reducing or solving these issues is therefore increasing, especially regarding the problem of plastic waste (Rodriguez-Uribe *et al.*, 2023). This has led to initiatives to tackle the plastic waste problem through various techniques, including reducing and eliminating the use of plastic. However, plastic remains essential to human daily life due to its many advantages, such as durability, lightweight, low cost, and ease of production (Mamatha *et al.*, 2024; Hong *et al.*, 2024). Therefore, researchers are trying to invent and develop plastics that provide convenience in human life while being environmentally friendly and not causing problems after use. The research and development of biodegradable plastics is a promising avenue in this regard (Sena *et al.*, 2023).

Biodegradable plastic refers to plastic that undergoes decomposition, ultimately being digested by microorganisms until it becomes water, carbon dioxide, and biomass under appropriate temperature and humidity conditions. After decomposition, no plastic parts or toxins remain (Royer *et al.*, 2023). Examples of biodegradable plastics include polycaprolactone (PCL), polyhydroxybutyrate (PHB), polybutylene succinate (PBS), polybutylene adipate co-terephthalate (PBAT), polylactic acid (PLA), and polyhydroxyalkanoates (PHAs) (Nachod *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2023). Among these biopolymers, polybutylene succinate is considered particularly important due to its straight chain structure, high melting point, crystallinity, heat resistance of up to 200°C, ease of formation, and similar mechanical properties to polyethylene (Zhou *et al.*, 2023). However, polybutylene succinate is still constrained by its high price. Therefore, efforts are underway to enhance and develop it through various methods to reduce costs while maintaining appropriate physical and mechanical properties, as well as biodegradability. For instance, a previous study focused on the preparation of composite materials from polylactic acid and polybutylene succinate mixed with corn starch and wheat straw for biodegradable packaging (Abdollahi Moghaddam *et al.*, 2023). Other research

includes the preparation of composites of polybutylene succinate mixed with natural rubber or activated carbon to increase mechanical properties (Prasoetsopha *et al.*, 2020; Singsang *et al.*, 2021) and using various natural fibers as reinforcements for polybutylene succinate (Calabia *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2018; Rodriguez-Uribe *et al.*, 2023).

Silk and other natural fibers are known to enhance mechanical properties, including tensile strength, modulus of elasticity, and impact resistance, of biodegradable composites due to their strong and resilient nature (Han *et al.*, 2010). In addition, natural fibers, such as silk, can promote the biodegradation of biodegradable composites by providing a substrate for microbial activity, thereby speeding up the breakdown of the composite materials into simpler, environmentally benign substances.

Based on the information above, silk fiber can be used as a reinforcement for polybutylene succinate, a biodegradable plastic, to improve mechanical properties and degradation rate. However, the silk production process results in a large number of discarded silkworm cocoons. Therefore, this research aims to use silkworm cocoons as a reinforcing material instead of silk fibers. The mechanical and biodegradation properties of composite materials obtained by mixing polybutylene succinate with silkworm cocoons were studied.

Experimental Procedure

Raw materials

Poly(butylene succinate) (PBS, FZ71PM, BioPBS™, melt flow rate (MFR) of 24.2 g/10 min, PTT MCC Biochem Company Limited) was used as the polymer matrix. The silkworm cocoons (Tubtim Siam) were sourced from a local producer in Yasothon, Thailand. After boiling the silkworm cocoons in water to remove the silk sericin and bring out the silk fibers, the remaining yellow silkworm cocoons were dried and cut into small pieces measuring 1 cm x 1 cm before being used as reinforcement materials. The average diameter of the silkworm cocoon fibers was about $16.03 \pm 2.57 \mu\text{m}$, as shown in Figure 1.

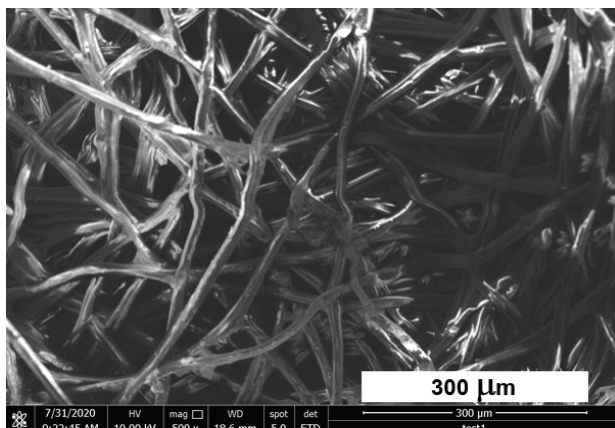


Figure 1 SEM images of silkworm cocoon.

Preparation of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

To prepare poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites, both the poly(butylene succinate) and silkworm cocoons were first dried at 60°C for 24 hours in an oven to remove moisture before mixing. Subsequently, they were mixed using an internal mixer (MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd., Thailand) at 145°C with a rotor speed of 50 rpm for 20 minutes. The mixture ratios by weight of poly(butylene succinate) to silkworm cocoon were 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40.

Sample preparation and testing

The composites were prepared in each ratio and ground with a plastic grinder to reduce the size, making them suitable for forming the test specimens. The test specimens for mechanical properties and decomposition in soil were formed using hot-compression molding at a pressure of 1500 psi and a temperature of 145°C for 11 minutes.

The mechanical property testing in terms of tensile testing were conducted according to ASTM D638 using a universal testing machine (LS Plus Series, Lloyd) with a load cell of 10 kN and a test speed of 50 mm/min. Hardness testing was conducted according to ASTM D2240 using a Durometer Shore D (GS-612, TECLOCK). Impact testing was performed using an INSTRON model CEAST 9050 according to ASTM D256.

For the biodegradability test, samples with a size of 1 cm x 1 cm x 0.3 cm were dried in an oven at 50°C for 24 hours, then weighed, and the weight recorded as w_0 . The samples were then buried in soil with a pH of

about 6-7.6 and moisture content of about 50–70% of dry soil weight, at a depth of 5 centimeters for 4, 8, and 10 weeks. After degradation, the samples were cleaned and weighed, and the weight recorded as w_f . The percentage weight loss was calculated using the equation: weight loss (%) = $(w_0 - w_f) \times 100/w_0$ (Peñas *et al.*, 2023). Photos of the samples were taken after decomposition durations of 4, 8, and 10 weeks.

The morphology of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites was investigated using a scanning electron microscope (SEM, Quanta 250 W7, Philips). The surface of the impact-tested samples was examined to analyze the characteristics of the silkworm cocoons within the poly(butylene succinate).

Results and Discussion

Mechanical properties of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

The stress-strain curves of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites, as shown in Figure 2, indicates that neat poly(butylene succinate) exhibits ductile fracture behavior. However, the addition of silkworm cocoons increased brittle fracture behavior. This is due to the natural fibers creating stress concentration points and poor interfacial adhesion with the polymer matrix, leading to brittle fracture behavior. These fibers restrict the plastic deformation of the matrix, or, in other words, the silk fibers obstruct the molecular chain movement of the polymers, resulting in reduced ductility.

The average Young's modulus of the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites increased with an increase in the silkworm cocoon content, as shown in Figure 3. The composite with 60/40 weight ratio of poly(butylene succinate) to silkworm cocoon exhibited the highest Young's modulus, accounting for a 348% increase compared to neat poly(butylene succinate). This indicates that silkworm cocoons can effectively reinforce poly(butylene succinate) by increasing its modulus due to the enhanced stiffness of the composite. Natural fibers, such as silkworm cocoon, are typically stiffer than the polymer matrix, and their inclusion restricts the deformation of the composite under load, leading to a higher modulus (Clarizio & Tatara, 2012).

In contrast, tensile strength and elongation at break decreased with an increase in the silkworm cocoon content, as shown in Figures 4 and 5, respectively. This can be attributed to the low bonding force between the silkworm cocoon and poly(butylene succinate), resulting in poor interfacial adhesion (Botev *et al.*, 1999; Sing-sang *et al.*, 2021). The addition of rigid fibers reduces the composite's ability to deform plastically because the fibers do not stretch as much as the polymer matrix. This results in a brittle composite that fractures at lower strains compared to the pure matrix. Essentially, the fibers limit the capacity of the matrix to elongate, thus reducing the overall elongation of the composite material (Seculi *et al.*, 2022).

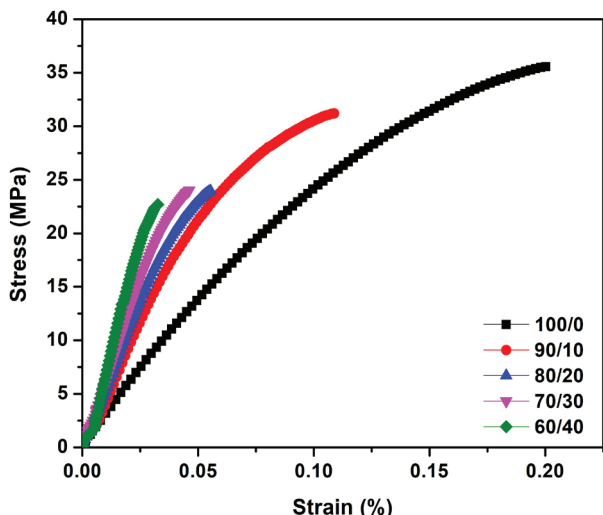


Figure 2 Stress-Strain curves of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

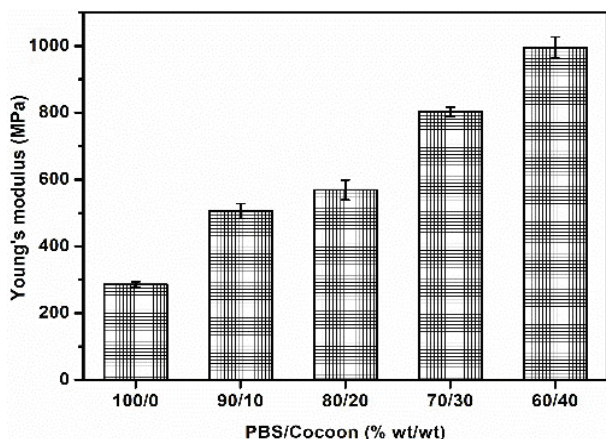


Figure 3 Young's modulus of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

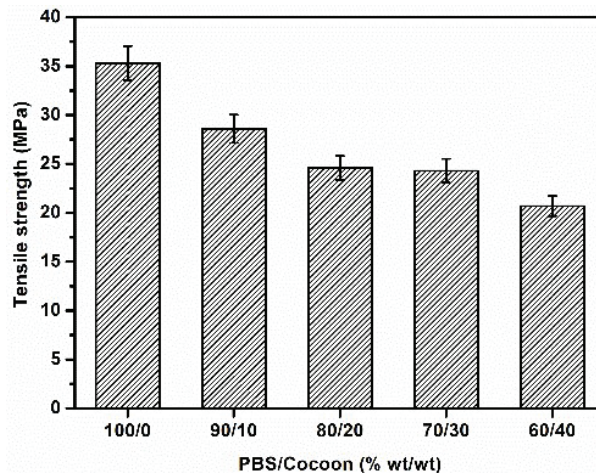


Figure 4 Tensile strength of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

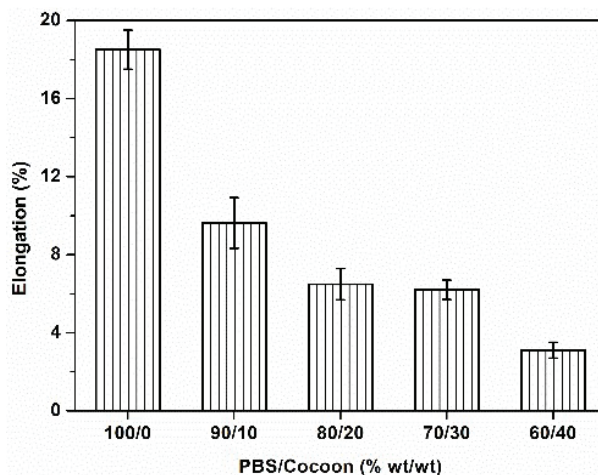


Figure 5 elongation at break of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

Figure 6 illustrates the hardness of the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites. It was found that the hardness slightly increased with an increase in the silkworm cocoon content. This might be because poly(butylene succinate) is a biodegradable polymer that is often noted for its brittleness and lower mechanical strength, despite being flexible and processable. When reinforced with natural fibers, including silk fibers, PBS composites tend to show improved mechanical properties such as increased hardness and tensile strength (Rajgond *et al.*, 2024). This improvement is attributed to the effective distribution of stress and the interaction between the polymer matrix and the reinforcing fibers (Chen *et al.*, 2017). According to a previous study, natural fibers can increase the hardness of biocomposite materials (Nithikarnjanatharn & Samsalee, 2022).

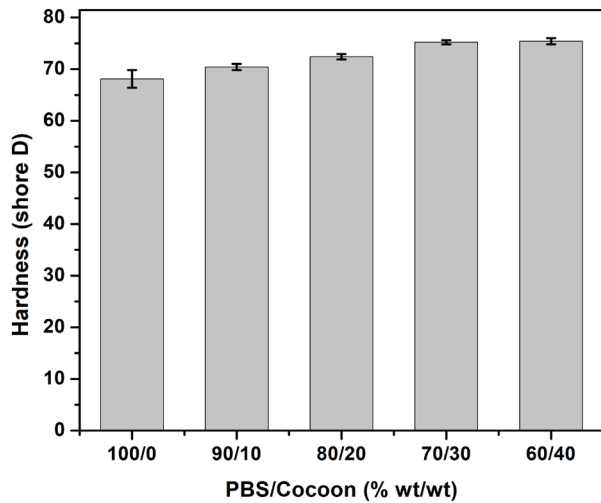


Figure 6 Hardness of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

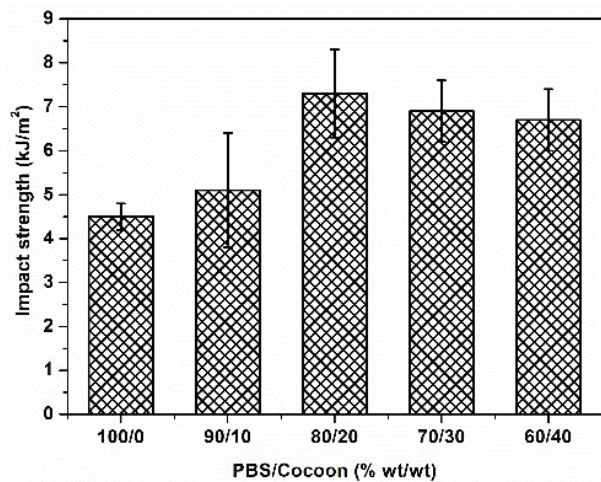


Figure 7 Impact strength of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

The impact resistance of the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites at weight ratios of 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40 was 4.51 ± 0.26 kJ/m², 5.08 ± 1.27 kJ/m², 7.28 ± 1.01 kJ/m², 6.93 ± 0.67 kJ/m², and 6.65 ± 0.71 kJ/m², respectively (Figure 7). It can be observed that the impact resistance increased with an increase in the silkworm cocoon content. This improvement is attributed to the silkworm cocoon fibers, which help delay crack initiation and control propagation within the polymer matrix, thereby distributing stress and absorbing energy (de Albuquerque *et al.*, 2000). The composite with the ratio of 80/20 exhibited the highest impact resistance, with slight decreases observed at 70/30 and 60/40, respectively, indicating that 80/20 was the optimal ratio. The decrease in impact strength at higher ratios may be attributed to the agglomeration of silkworm cocoons, causing them to act as stress concentrators when their content exceeds the optimum value (Johansson *et al.*, 2023). However, even with this slight decrease, the impact resistance remained higher than that of pure poly(butylene succinate).

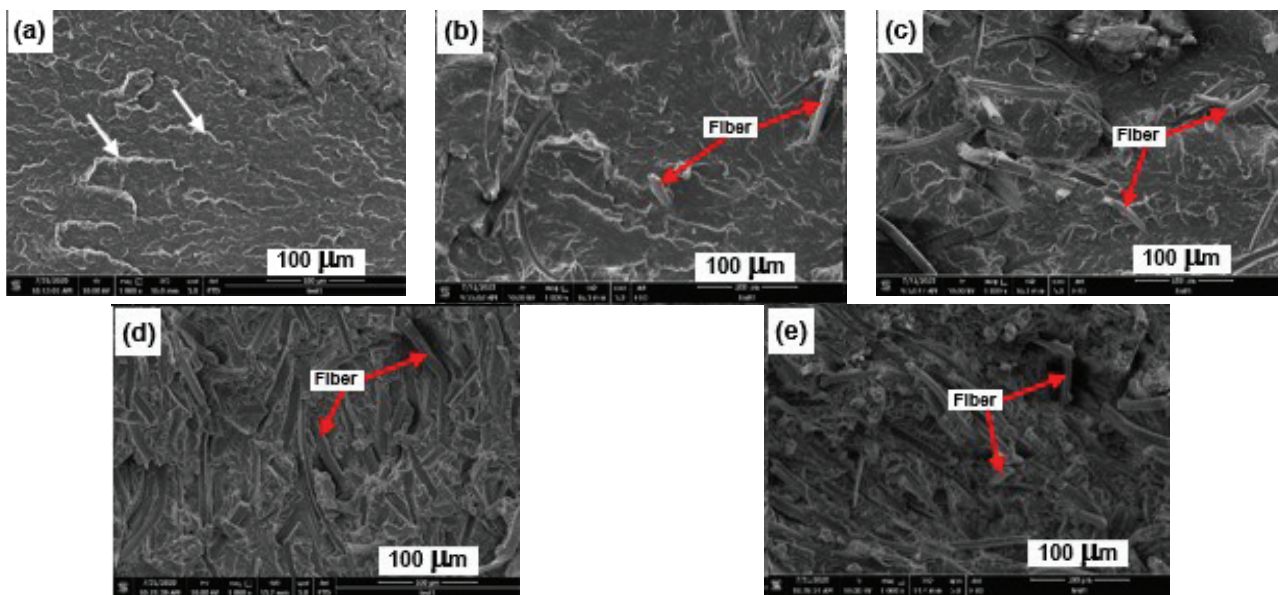


Figure 8 SEM images of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites in ratios of (a) 100/0, (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30, and (e) 60/40.

The surface characteristics of the impact- tested samples of the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites are shown in Figure 8. It was observed that the surface of pure poly(butylene succinate) exhibited regular tear lines resulting from impact testing, as indicated by the white arrows in Figure 8(a). When silkworm cocoon fibers were added, tear lines and silk fibers could be seen scattered throughout the poly(butylene succinate), with

some fibers protruding and detaching from the matrix, as indicated by the red arrows in Figures 8(b)-(e). It was also found that the silkworm cocoons were distributed evenly. As the concentration of silkworm cocoons increased, the silk fibers became more widely distributed across the surface of the impact test samples, and the density of the fibers increased.

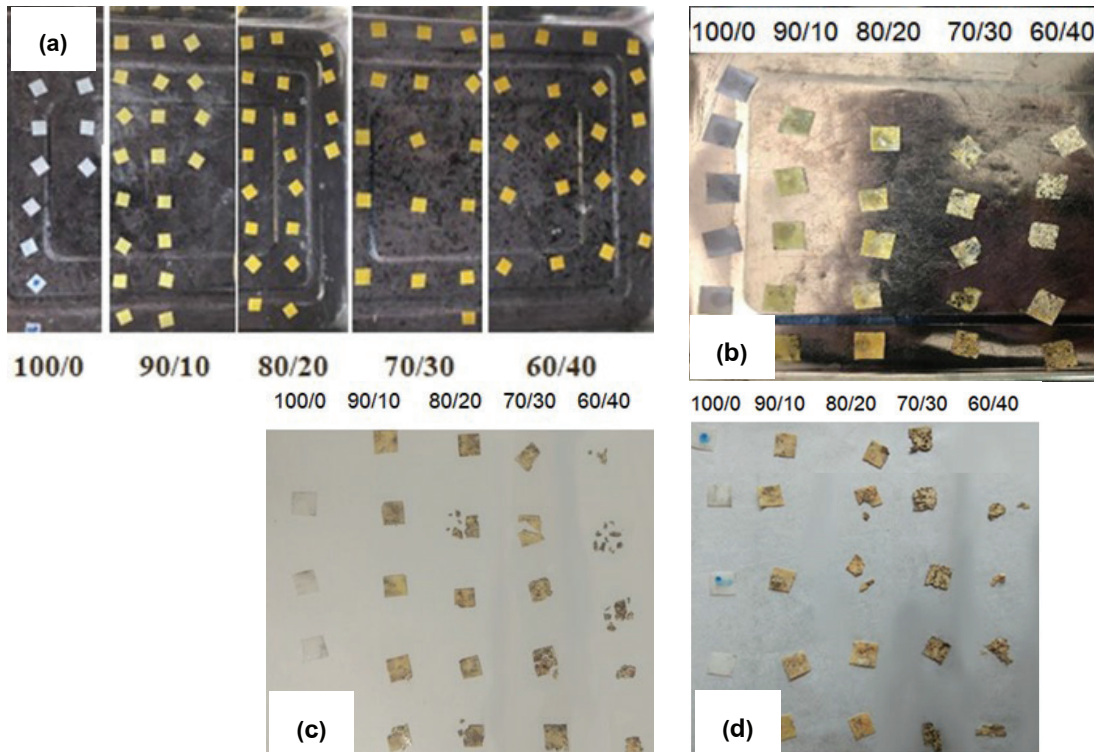


Figure 9 Biodegradation photos of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites (a) before, (b) after 4 weeks, (c) after 8 weeks, and (d) after 10 weeks

Figure 9 shows the photos of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites, which were buried in soil to assess their biodegradation behavior. The images revealed that after being buried, the specimens exhibited a roughened surface and evident fractures, indicative of biodegradation. These surface alterations and fractures became more pronounced with longer burial durations, suggesting ongoing surface erosion over time (Wei *et al.*, 2022).

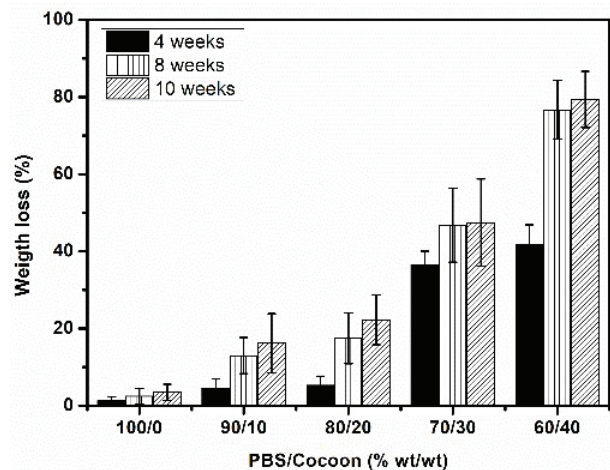


Figure 10 Weight loss of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites in soil

Table 1 Biodegradation rate of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites

Composite ratios	Biodegradation rate (mg/day)	
	average	S.D.
100/0	0.016	0.001
90/10	0.082	0.018
80/20	0.106	0.028
70/30	0.361	0.116
60/40	0.533	0.073

The weight loss percentage of poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites over various burial periods is shown in Figure 10. It was found that after 4 weeks of burial, the composites with ratios of 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40 had average weight loss percentages of $1.3 \pm 1.0\%$, $4.5 \pm 2.4\%$, $5.3 \pm 2.4\%$, $36.5 \pm 3.5\%$, and $41.8 \pm 5.1\%$, respectively. The results indicate that the percentage of weight loss generally increased with an increase in the amount of silkworm cocoon. The composite with the ratio of 60/40 showed the most significant biodegradation at 4 weeks. This trend remained consistent as the burial duration extended to 8 and 10 weeks. After 10 weeks, the 60/40 composite had the highest biodegradation, with a weight loss of $79.1 \pm 7.4\%$, demonstrating that the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composite is naturally biodegradable. This degradation likely resulted from microbial activity under environmental conditions (Sasimowski *et al.*, 2023). Additionally, the 60/40 composite exhibited the highest biodegradation rate, at 0.533 ± 0.073 mg/day, as shown in Table 1.

Conclusions

Poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites were prepared using an internal mixer and hot-compression molding. The ratio of poly(butylene succinate) to silkworm cocoon affected the mechanical properties of the composites. The Young's modulus, impact resistance, and hardness increased with an increase in the amount of silkworm cocoon, while the tensile strength and elongation at break decreased due to poor interfacial

adhesion between the silkworm cocoon and poly(butylene succinate). In addition, the results from the biodegradation test showed that the poly(butylene succinate)/silkworm cocoon composites with a ratio of 60/40 had the highest biodegradation, at $79.1 \pm 7.4\%$, after 10 weeks.

Acknowledgments

The research team would like to thank the Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan for providing the location, tools, and equipment for this research experiment.

References

- Abdollahi Moghaddam, M. R., Hesarinejad, M. A., & Javidi, F. (2023). Characterization and optimization of polylactic acid and polybutylene succinate blend/starch/wheat straw biocomposite by optimal custom mixture design. *Polymer Testing*, 121, Article 108000. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108000>
- Botev, M., Betchev, H., Bikiaris, D., & Panayiotou, C. (1999). Mechanical properties and viscoelastic behavior of basalt fiber-reinforced polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(3), 523–531. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991017\)74:3<AID-APP7>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991017)74:3<AID-APP7>3.0.CO;2-R)
- Calabia, B., Ninomiya, F., Yagi, H., Oishi, A., Taguchi, K., Kunioka, M., & Funabashi, M. (2013). Biodegradable poly(butylene succinate) composites reinforced by cotton fiber with silane coupling agent. *Polymers*, 5(1), 128–141. <https://doi.org/10.3390/polym5010128>
- Chen, S., Cheng, L., Huang, H., Zou, F., & Zhao, H.-P. (2017). Fabrication and properties of poly(butylene succinate) biocomposites reinforced by waste silk worm silk fabric. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.01.004>
- Clarizio, S. C., & Tatara, R. A. (2012). Tensile strength, elongation, hardness, and tensile and flexural moduli of PLA filled with glycerol-plasticized DDGS. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(3), 638–646. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0452-3>

- de Albuquerque, A. C., Joseph, K., de Carvalho, L. H., & d'Almeida, J. R. M. (2000). Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, *60*(6), 833–844. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00188-8)
- Mamatha, G. M., Dixit, P., Krishna, R. H., & Girish Kumar, S. (2024). Polymer-based composites for electromagnetic interference (EMI) shielding: The role of magnetic fillers in effective attenuation of microwaves, a review. *Hybrid Advances*, *6*, Article 100200. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100200>
- Han, S. O., Ahn, H. J., & Cho, D. (2010). Hygrothermal effect on henequen or silk fiber reinforced poly(butylene succinate) biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, *41*(6), 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.05.003>
- Hong, J., Luo, N., Zhang, Z., Zhang, L., Zhang, G., Ye, L., Ray, S. S., & Li, Y. (2024). Regulated orientation and exfoliation of flaky fillers by close packing structures in polymer composites for excellent thermal conduction and EMI shielding. *Composites Part B: Engineering*, *275*, Article 111357. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111357>
- Huang, Z., Qian, L., Yin, Q., Yu, N., Liu, T., & Tian, D. (2018). Biodegradability studies of poly(butylene succinate) composites filled with sugarcane rind fiber. *Polymer Testing*, *66*, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.02.003>
- Johansson, M., Skrifvars, M., Kadi, N., & Dhakal, H. N. (2023). Effect of lignin acetylation on the mechanical properties of lignin-poly-lactic acid biocomposites for advanced applications. *Industrial Crops and Products*, *202*, Article 117049. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117049>
- Nachod, B., Keller, E., Hassanein, A., & Lansing, S. (2021). Assessment of petroleum-based plastic and bioplastics degradation using anaerobic digestion. *Sustainability*, *13*(23), Article 13295. <https://doi.org/10.3390/su132313295>
- Nithikarnjanatharn, J., & Samsalee, N. (2022). Effect of cassava pulp on physical, mechanical, and biodegradable properties of poly(butylene succinate)-based biocomposites. *Alexandria Engineering Journal*, *61*(12), 10171–10181. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.052>
- Peñas, M. I., Criado-Gonzalez, M., Martínez de Iarduya, A., Flores, A., Raquez, J.-M., Mincheva, R., Müller, A. J., & Hernández, R. (2023). Tunable enzymatic biodegradation of poly(butylene succinate): Biobased coatings and self-degradable films. *Polymer Degradation and Stability*, *211*, Article 110341. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110341>
- Prasoetsopha, N., Thainoi, P., Jinnavat, R., Chareerntanom, W., Hasook, A., & Singsang, W. (2020). Morphological and mechanical properties of natural rubber compound/poly(butylene succinate) blend. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *840*(1), Article 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/840/1/012013>
- Rajgond, V., Mohite, A., More, N., & More, A. (2024). Biodegradable polyester-polybutylene succinate (PBS): A review. *Polymer Bulletin*, *81*(7), 5703–5752. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04998-w>
- Rodriguez-Urbe, A., Harder, N., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2023). Biocomposites from poly(butylene succinate-co-butylene adipate) biodegradable plastic and hop natural fiber: Studies on the effect of compatibilizer on performance of the composites. *Composites Part C: Open Access*, *12*, Article 100408. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100408>
- Royer, S.-J., Greco, F., Kogler, M., & Deheyn, D. D. (2023). Not so biodegradable: Polylactic acid and cellulose/plastic blend textiles lack fast biodegradation in marine waters. *PLoS ONE*, *18*(5), Article e0284681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284681>
- Sasimowski, E., Majewski, L., & Grochowicz, M. (2023). Study on the biodegradation of poly(butylene succinate)/wheat bran biocomposites. *Materials*, *16*(21), Article 6843. <https://doi.org/10.3390/ma16216843>

- Seculi, F., Espinach, F. X., Julián, F., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., & Tarrés, Q. (2022). Evaluation of the strength of the interface for abaca fiber reinforced HDPE and BioPE composite materials, and its influence over tensile properties. *Polymers*, 14(24), Article 5412. <https://doi.org/10.3390/polym14245412>
- Sena, B., Aceña, J. L., Novella Robisco, J. L., Monje Martínez, B., Martí Montaner, L., & Fernández-Bachiller, M. I. (2023). Effectiveness of different immobilized *Candida antarctica* lipase b (iCaLB) in the production of biobased oligoester derivatives from poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate) (PBA). *European Polymer Journal*, 201, Article 112575. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112575>
- Singsang, W., Suetrong, J., Choedsanthia, T., Srakaew, N. L.-o., Jantrasee, S., & Prasoetsopha, N. (2021). Properties of biodegradable poly(butylene succinate) filled with activated carbon synthesized from waste coffee grounds. *Journal of Materials Science and Applied Energy*, 10(3), 87–95. <https://doi.org/10.14456/jmsae-ceae.2021.32>
- Wei, X.-F., Capezza, A. J., Cui, Y., Li, L., Hakonen, A., Liu, B., & Hedenqvist, M. S. (2022). Millions of microplastics released from a biodegradable polymer during biodegradation/enzymatic hydrolysis. *Water Research*, 211, Article 118068. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118068>
- Xie, C., Xiong, Q., Wei, Y., Li, X., Hu, J., He, M., Wei, S., Yu, J., Cheng, S., Ahmad, M., Liu, Y., Luo, S., Zeng, X., Yu, J., & Luo, H. (2023). Fabrication of biodegradable hollow microsphere composites made of polybutylene adipate co-terephthalate/polyvinylpyrrolidone for drug delivery and sustained release. *Materials Today Bio*, 20, Article 100628. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100628>
- Zhou, H., Hu, D., Zhu, M., Xue, K., Wei, X., Park, C. B., Wang, X., & Zhao, L. (2023). Review on poly (butylene succinate) foams: Modifications, foaming behaviors and applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 38, Article e00720. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00720>

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนในตัวแปรตามสำหรับการจำแนก

Comparison of the efficiency of noise handling methods in dependent variable for classification model

กฤษฎี ศิริเรือง¹ และ ประภาศิริ รัชชประภาพรกุล^{2*}
Kritsadee Siriruang¹ and Prapasiri Ratchaprapapornkul^{2*}

Received: 23 April 2024 ; Revised: 28 May 2024 ; Accepted: 12 June 2024

บทคัดย่อ

ข้อมูลรบกวนเป็นปัญหาหลักที่พบในชุดข้อมูล ซึ่งหากเกิดกับตัวแปรตามจะนำไปสู่การเรียนรู้กลุ่มที่ผิดพลาด จึงต้องจัดการกับข้อมูลรบกวนก่อนนำไปวิเคราะห์จำแนกกลุ่มข้อมูล โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบการจำแนกระหว่างวิธีการจัดข้อมูลรบกวนด้วยตัวกรองข้อมูล 4 วิธี ได้แก่ วิธี Condensed Nearest Neighbor (CNN), วิธี Edited Nearest Neighbors (ENN), วิธี Cross-Validated Committees Filter (CVCF) และ วิธี Iterative Partitioning Filter (IPF) และวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนจากวิธีการจัดข้อมูลรบกวนร่วมกับการประมาณค่าทดแทนพหุ 3 วิธี ได้แก่ วิธี polytomous regression (polyreg), วิธีป่าสุ่ม (random forest: rf) และ วิธี multiple imputation through XGBoost (mixgb) โดยศึกษาผ่านการจำลองข้อมูลแบบมอนติคาร์โล ภายใต้สถานการณ์ของขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100, 500 และ 1,000 หน่วย ปริมาณข้อมูลรบกวนเท่ากับ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวน พิจารณาจากค่า F1 ของตัวแบบการจำแนก 4 วิธี ได้แก่ วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด, วิธีป่าสุ่ม, วิธีนาอ็พเบย์ และวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายทาง ผลการศึกษาพบว่าวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนมีอิทธิพลปฏิสัมพันธ์กับทุกปัจจัย ได้แก่ ขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนกที่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ F1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยหากตัวอย่างขนาดเล็ก (n = 100) การปรับค่าตัวแปรตามจะมีแนวโน้มดีกว่าการจัดข้อมูลรบกวน แต่เมื่อขนาดตัวอย่างขนาดใหญ่ขึ้นทั้ง 2 วิธีจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณข้อมูลรบกวนเพิ่มขึ้นค่าประสิทธิภาพ F1 มีแนวโน้มลดลง และประสิทธิภาพของวิธีการจัดการด้วยการปรับค่าตัวแปรตามมีแนวโน้มดีกว่าในทุกตัวแบบ ในภาพรวมประสิทธิภาพของวิธีการปรับค่าตัวแปรตามด้วยตัวกรอง ENN ร่วมกับการประมาณค่าทดแทนพหุด้วยวิธี polyreg มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพ F1 สูงสุดเกือบทุกกรณี ยกเว้นกรณีที่ขนาดตัวอย่างเป็น 1,000 หน่วย ที่วิธีการ ENN จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลการวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อค้นพบถึงวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์การจำแนกกลุ่มข้อมูล

คำสำคัญ: ข้อมูลรบกวน, การจำแนก, การประมาณค่าทดแทนพหุ, การเรียนรู้ของเครื่อง, ตัวกรองข้อมูลรบกวน

¹ นิสิตระดับมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิธีวิทยาการพัฒนานวัตกรรมทางการศึกษา ภาควิชาวิจัยและจิตวิทยาการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิธีวิทยาการพัฒนานวัตกรรมทางการศึกษา ภาควิชาวิจัยและจิตวิทยาการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹ Master degree student, Division of Methodology for Innovation Development in Education, Department of Educational Research and Psychology, Faculty of Education, Chulalongkorn University

² Lecturer, Division of Methodology for Innovation Development in Education, Department of Educational Research and Psychology, Faculty of Education, Chulalongkorn University

* Corresponding author E-mail: prapasiri.r@chula.ac.th

Abstract

Noisy data is a major problem often encountered in datasets. When noise affects the dependent variable, it can lead to incorrect group in classification. Therefore, it is essential to handle noise before analyzing and classifying the data. This research aims to compare the effectiveness of class noise handling method in classification model between noise removal methods using four noise filter: Condensed Nearest Neighbor (CNN), Edited Nearest Neighbors (ENN), Cross-Validated Committees Filter (CVCF), and Iterative Partitioning Filter (IPF), and relabel methods that utilize noise filter from noise removal methods along with multiple imputation from three methods: polytomous regression (polyreg), random forest (rf), and multiple imputation through XGBoost (mixgb). The study is conducted through Monte Carlo simulation under the scenario with sample sizes of 100, 500, and 1,000 units, and noise level of 10%, 20%, 30%, and 40%. The performance of noise handling methods is evaluated based on the F1 score of four data classification models: k-NN, Random Forest, Naïve Bayes, and Support Vector Machine. Comparison is done through N-Way analysis of variance (N-Way ANOVA). The study found that the class noise handling methods have an interaction effect with all factors, including sample size, noise level, and classification model, affecting the F1 score significantly at the .05 level of significance. For small sample sizes ($n = 100$), relabel method tended to perform better than remove method. However, as sample size increased, both methods showed similar performance. Overall, the combination of ENN noise filter with polytomous regression imputation tended to yield the highest F1 score in most cases, except for sample sizes of 1,000 units where ENN alone showed the highest performance. The findings of this research provide insights into appropriate class noise handling methods for different data classification scenarios.

Keywords: Noisy data, classification, multiple imputation, machine learning, noise filter

บทนำ

คุณภาพของข้อมูลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ข้อมูล โดยเฉพาะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) ในการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ที่ใช้สำหรับการจำแนกกลุ่มข้อมูล (classification) โดยชุดข้อมูลเรียนรู้ (training data) จะต้องมีคุณภาพเพียงพอ เพื่อให้ผลการทำนายในชุดข้อมูลใหม่มีความถูกต้องแม่นยำ (Moura *et al.*, 2022) ข้อมูลรบกวน (noisy data) เป็นปัญหาหลักที่พบในชุดข้อมูล (Nguyen-Van, 2020; Zhu & Wu, 2004) โดยเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งในกระบวนการจำแนก (classification) ที่มีตัวแปรตามเป็นตัวแปรจัดประเภท หรือกระบวนการถดถอย (regression) ที่มีตัวแปรตามเป็นตัวแปรต่อเนื่อง ซึ่งปัญหาข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ข้อมูล เพิ่มเวลา และความซับซ้อนในการวิเคราะห์

ข้อมูลรบกวนสามารถเกิดได้กับตัวแปรทั้ง 2 ประเภท ในตัวแบบ ทั้งตัวแปรอิสระหรือตัวแปรคุณลักษณะ (attribute variable) และตัวแปรตาม (class variable) โดยข้อมูลรบกวนที่เกิดกับตัวแปรอิสระ เป็นข้อมูลที่มีค่าผิดพลาด สูญหาย ไม่สมบูรณ์ หรือข้อมูลไม่ตรงตามช่วงหรือลักษณะข้อมูลที่ควรจะเป็น ซึ่งจะเรียกข้อมูลรบกวนนี้ว่า "attribute noise" ส่วนข้อมูลรบกวนที่เกิดกับตัวแปรตามจะเรียกว่า class noise หรือ label noise เป็นการระบุกลุ่มของข้อมูลผิดพลาดที่อาจ

จะเกิดจากตัวบุคคลที่ทำหน้าที่ระบุกลุ่มผิดพลาด หรือข้อมูลที่นำมาใช้ตัดสินกลุ่มไม่มีคุณภาพเพียงพอ หรือเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลบกพร่อง และมีปัญหาอื่นๆ เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการระบุกลุ่มข้อมูล (Sáez *et al.*, 2013; García *et al.*, 2019) โดยข้อมูลรบกวนที่เกิดกับตัวแปรตามนี้จะนำไปสู่การเรียนรู้กลุ่มที่ผิดพลาดเมื่อนำไปวิเคราะห์จำแนกกลุ่มข้อมูล

ปัญหาข้อมูลรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายบริบท เช่น ในทางการแพทย์ พบว่า สามารถเกิดข้อมูลรบกวนจากการระบุกลุ่มโรคผิดพลาด โดยข้อผิดพลาดนี้มาจากตัวบุคคลผู้ระบุกลุ่มเองที่อาจจะทำงานภายใต้ความซับซ้อน กดดัน และเหนื่อยล้า (Sáez *et al.*, 2016) ในทางวิทยาศาสตร์อาจเกิดข้อมูลรบกวนจากเครื่องมือที่ใช้วัดเกิดความบกพร่อง ทำให้ได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยเมื่อพิจารณาถึงในบริบททางการศึกษา พบว่า ในปัจจุบันได้มีการใช้สื่อเทคโนโลยี ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ในการจัดการเรียนการสอน รวมทั้งมีการนำหลักการเรียนรู้ของเครื่อง และการวิเคราะห์เหมืองข้อมูลทางการศึกษา มาวิเคราะห์การเรียนรู้ และพัฒนาตัวแบบเชิงทำนายเพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผู้เรียน ข้อมูลที่เข้ามาจะมีขนาดใหญ่ และมาจากหลายๆ แหล่ง ทำให้พบปัญหาข้อมูลรบกวนที่เป็นปัญหาสำคัญที่ต้องจัดการก่อนนำไปวิเคราะห์ (Hassan *et al.*, 2020) ตัวอย่างของปัญหาข้อมูลรบกวนในทางการศึกษา

เช่น การจัดการเรียนการสอนรูปแบบใหม่ในลักษณะของห้องเรียนอัจฉริยะ (smart classroom) ที่มีการใช้ทั้งระบบออนไลน์ หรือออฟไลน์ และมีการใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับนักเรียนของเครื่องในการจัดกลุ่มผู้เรียนจากพฤติกรรมและอารมณ์ความรู้สึก การที่ต้องพิจารณาตัดสินกลุ่มจากคุณลักษณะหลายๆ อย่างที่มีการนำเข้าข้อมูลจากเครื่องมือหรืออุปกรณ์หลายแหล่งพร้อมกัน อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายกลุ่มผู้เรียน ซึ่งทำให้เกิดข้อมูลรบกวนในตัวแปรตาม นอกจากนี้ข้อมูลรบกวนอาจเกิดได้ในกรณีที่ตัวบุคคลผู้ให้คะแนนเองทั้งเพื่อนร่วมชั้นและครูเกิดความคลาดเคลื่อน หรืออคติในการให้คะแนนเพื่อระบุงroupของผู้เรียนในการวัดและประเมินผลการเรียนรู้ เมื่อต้องประเมินผลจากการทำกิจกรรมที่มีการลงมือปฏิบัติจริง พฤติกรรมในการเรียนรู้ และการนำเสนอที่มีหลายตัวชี้วัดพร้อมกัน (Kim *et al.*, 2018; Miller & Soh, 2013) จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเกิดข้อมูลรบกวนที่ตัวแปรตามสามารถเกิดได้หลายสถานการณ์ตามบริบทจริงซึ่งในสถานการณ์จริงการระบุว่าจะกลุ่มที่ระบุเป็นข้อมูลรบกวนหรือเป็นกลุ่มที่ถูกต้อง สามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การสำรวจข้อมูลโดยใช้สถิติบรรยาย เพื่อดูลักษณะข้อมูล และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ หรือใช้การแบ่งกลุ่มข้อมูล (clustering) ในการจัดกลุ่มเพื่อดูความแตกต่างของกลุ่มที่จัดขึ้นกับกลุ่มที่ระบุ นอกจากนี้ยังสามารถใช้การจำแนก (classification) ด้วยตัวแบบต่างๆ ในการระบุกลุ่มโดยหากกลุ่มที่ได้จากการทำนายไม่ตรงกับกลุ่มที่เก็บข้อมูลมา หรือไม่ตรงกับกลุ่มของข้อมูลอื่นที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกันก็จะสามารถบอกได้ว่าอาจจะเป็นข้อมูลรบกวน (Frény & Verleysen, 2013)

นอกจากนี้การเกิดข้อมูลรบกวนในตัวแปรตามสามารถเกิดได้อย่างมีรูปแบบ โดย Schafer and Graham (2002) ได้ศึกษาไว้จำนวน 3 รูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1) NCAR (Noise Completely at Random) เป็นข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นอย่างอิสระโดยไม่ขึ้นกับตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม 2) NAR (Noise at Random) เป็นข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรตาม และ 3) NNAR (Noise not at Random) เป็นข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งโดยธรรมชาติของข้อมูลจริง รูปแบบของข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปมักจะเป็นแบบ NNAR เนื่องจากการเกิดข้อมูลรบกวนในตัวแปรตาม อาจเกิดมาจากการระบุงroupผิดพลาดอันเนื่องมาจากข้อมูลจากตัวแปรอิสระที่เกิดความคลาดเคลื่อนจากการบันทึกข้อมูลโดยผู้วิจัยเอง หรือผู้ให้ข้อมูลมีการให้ข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือปกปิดข้อมูลบางส่วนไว้ โดยปัจจุบันยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาการจัดการกับข้อมูลรบกวนรูปแบบนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเฉพาะปัญหาข้อมูลรบกวนที่เกิดกับตัวแปรตามที่มีลักษณะการเกิดแบบ NNAR

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการจัดการกับปัญหาข้อมูลรบกวนที่ตัวแปรตาม พบว่าสามารถกระทำได้ 2 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการระดับอัลกอริทึมเป็นการใช้ตัวแบบที่มีความทนต่อข้อมูลรบกวน โดยไม่ต้องมีการจัดการกับข้อมูลรบกวนก่อนนำไปวิเคราะห์ (Miao *et al.*, 2015) และ 2) กระบวนการระดับข้อมูล เป็นการจัดการกับข้อมูลรบกวนโดยการขจัดข้อมูลรบกวน (remove) หรือปรับค่าของข้อมูลใหม่ (relabel) นิยมใช้ในอัลกอริทึมที่ไม่ทนต่อข้อมูลรบกวน หรือต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม (Brodley & Friedl, 1999) สำหรับวิธีการขจัดข้อมูลรบกวนจะใช้ ตัวกรองข้อมูลรบกวน (noise filter) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม similarity ที่มีวิธีการพิจารณาข้อมูลรบกวนโดยใช้เทคนิคเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (k-Nearest Neighbors: k-NN) และเทคนิคอื่นๆ ที่พิจารณาระยะทางระหว่างข้อมูล ตัวอย่าง ได้แก่ All-k Edited Nearest Neighbors (AENN), Blame Based Noise Reduction (BBNR), Condensed Nearest Neighbor (CNN) และ Edited Nearest Neighbors (ENN) และกลุ่ม ensemble ที่มีวิธีการพิจารณาข้อมูลรบกวนโดยใช้ตัวแบบในการจำแนกหลายๆ ครั้ง เพื่อตรวจสอบข้อมูลรบกวนตัวอย่าง ได้แก่ Cross-Validated Committees Filter (CVCF), Ensemble Filter (EF), High Agreement Random Forest (HARF) และ Iterative Partitioning Filter (IPF) ซึ่งการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนจะดำเนินการกับข้อมูลหลังตรวจพบด้วยการขจัดทั้งแถวข้อมูลออกจากชุดข้อมูล ซึ่งจะเกิดเป็นข้อมูลสูญหาย ที่ทำให้สูญเสียข้อมูลบางส่วนในการนำไปเรียนรู้

ส่วนการจัดการข้อมูลรบกวนในรูปแบบของการปรับค่าข้อมูลตัวแปรตาม โดยไม่ขจัดแถวข้อมูลออกจากชุดข้อมูล มีงานวิจัยเสนอวิธีการไว้อย่างหลากหลาย เช่น การปรับค่าด้วยการเรียนรู้ค่าที่ถูกต้อง (Self-training correction) โดยใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนออกแล้วให้ตัวแบบเรียนรู้จากค่าที่ไม่ได้เป็นข้อมูลรบกวน และสร้างค่าใหม่ที่ถูกต้องขึ้นมาทดแทน (Nicholson *et al.*, 2016) หรือใช้การจัดกลุ่มข้อมูลด้วย k-means เพื่อตรวจสอบข้อมูลรบกวน แล้วใช้ตัวแบบทำนายเพื่อปรับค่าใหม่ให้ถูกต้องตามกลุ่ม (Nematzadeh *et al.*, 2020)

จากการศึกษาข้างต้น หากใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนจะทำให้เกิดข้อมูลสูญหาย ผู้วิจัยจึงศึกษาวิธีแก้ปัญหามูลสูญหาย พบว่า วิธีประมาณค่าการทดแทน (imputation) ที่มีการคำนวณค่ามาทดแทนข้อมูลที่สูญหาย ถูกนำมาใช้อย่างหลากหลายทั้งในทางสถิติและทางการเรียนรู้ด้วยเครื่อง (Sun *et al.*, 2023) โดยสามารถแบ่งเป็น 1) การประมาณค่าการทดแทนด้วยค่าเดียว (single imputation) และ 2) การประมาณค่าทดแทนพหุ (multiple imputation) ซึ่งการประมาณค่าทดแทนพหุจะมีข้อดีกว่าการประมาณค่าด้วยค่าเดียว เนื่องจากจะคำนวณค่าทดแทนขึ้นมาหลายชุด แล้วใช้สถิติเพื่อประเมิน

หาค่าทดแทนที่ดีที่สุด ที่จะลดความลำเอียงจากการประมาณค่า (Van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011; Li *et al.*, 2015) ทั้งนี้วิธีการประมาณค่าทดแทนพหุที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ Multivariate Imputation by Chained Equations (MICE) (Sun *et al.*, 2023) ซึ่งภายในวิธี MICE จะประมาณค่าโดยสามารถเลือกรูปแบบตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลได้ โดยตัวแบบที่เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับประมาณค่าข้อมูลตัวแปรตามที่เป็นเชิงกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป คือ Imputation of unordered data by polytomous regression (polyreg) หากพิจารณาถึงตัวแบบอื่นๆ ในงานวิจัยของ Buczak *et al.* (2023) ระบุว่า การใช้ตัวแบบป่าสุ่มในการประมาณค่าในอัลกอริทึมของ MICE มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้การประมาณค่าด้วยป่าสุ่ม (random forest: rf) ผ่านอัลกอริทึมอื่นในหลายสถานการณ์ของการเกิดข้อมูลสูญหาย นอกจากนี้ ในการประมาณค่าทดแทนที่กล่าวมา ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่จะใช้เวลาในการประมวลผล จึงมีผู้พัฒนาวิธีการ Multiple Imputation Through XGBoost (mixgb) ที่มีการใช้อัลกอริทึม XGBoost ในการประมาณค่า มีการสุ่มตัวอย่างย่อย และใช้วิธีทำนายผ่านการสร้าง Boosting tree ที่สามารถทำงานได้เร็วกับข้อมูลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน (Deng & Lumley, 2023) จากที่กล่าวมา พบว่า วิธีการประมาณค่าทดแทนพหุสามารถนำป้ ทดแทนข้อมูลสูญหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ จึงนำการประมาณค่าทดแทนดังกล่าวมาใช้ร่วมกับการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวน สำหรับใช้เป็นวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่เป็นข้อมูลรบกวนให้ถูกต้องก่อนการนำไปวิเคราะห์

จากประเด็นที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบการจำแนกระหว่างวิธีการขจัดข้อมูลรบกวนด้วยตัวกรองข้อมูล 4 วิธี ได้แก่ วิธี CNN, วิธี ENN, วิธี CVCF และ วิธี IPF และวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนจากวิธีการขจัดข้อมูลรบกวนร่วมกับการประมาณค่าทดแทนพหุ 3 วิธี ได้แก่ วิธี polyreg, วิธี rf และ วิธี mixgb เมื่อสถานการณ์ของขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100, 500 และ 1,000 หน่วย ปริมาณข้อมูลรบกวนเท่ากับ 10%, 20%, 30% และ 40% และตัวแบบการจำแนกกลุ่มข้อมูลเป็น วิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (k-Nearest Nearest Neighbors: k-NN), วิธีป่าสุ่ม (Random Forest: rf), วิธีนาอิวเบย์ (Naïve Bayes: NB) และวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) ผ่านการจำลองข้อมูลแบบมอนติคาร์โล เพื่อให้ครอบคลุมกับสถานการณ์ที่แตกต่างกัน และให้ได้ข้อค้นพบถึงวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผ่านการจำลองข้อมูลด้วยวิธีการมอนติคาร์โลผ่านโปรแกรม R เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบการจำแนกโดยวนซ้ำ 500 รอบ ซึ่งเป็นจำนวนรอบที่ทำให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำเพียงพอและใช้เวลาไม่มากเกินไปในการประมวลผล (Zhang & Cui, 2023) โดยมีขั้นตอนการวิจัย ดังนี้

1. การจำลองข้อมูลสมมุต กำหนดเงื่อนไขขนาดตัวอย่างขนาดตัวอย่างเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 100, 500 และ 1,000 หน่วย กำหนดแปรอิสระจำนวน 10 ตัวแปร แบ่งเป็นตัวแปรจัดประเภท 5 ตัวแปร ที่มีการแจกแจงแบร์นูลลี โดยกำหนดพารามิเตอร์เป็น $x_i \sim Ber(0.5)$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, 5$ และตัวแปรต่อเนื่องมีการแจกแจงแบบปกติ จำนวน 5 ตัวแปร โดยกำหนดพารามิเตอร์เป็น $x_j \sim N(0,1)$ โดยที่ $j = 6, 7, \dots, 10$ การกำหนดให้มีตัวแปรแต่ละประเภทมีการแจกแจงเดียวกัน เพื่อให้สอดคล้องกับการแปลงข้อมูลให้อยู่ในหน่วยเดียวกันในทางปฏิบัติ กำหนดให้ตัวแปรอิสระในแต่ละคู่ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันขนาดต่ำ ($r = 0.3$) ผู้วิจัยจำลองตัวแปรตามเป็นตัวแปรจัดประเภทที่แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยมีเงื่อนไขให้อัตราออก (odd ratio) เป็น 3 ระดับ โดยแต่ละระดับจะสุ่มจากช่วงดังต่อไปนี้ ระดับต่ำ $[0,1)$, ระดับกลาง $[1,2)$ และระดับสูง $[2,3)$ และนำมาใช้ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) แต่ละตัวของตัวแบบ และจำลองตัวแปรตามผ่านตัวแบบการถดถอยลอจิสติกอเนกนาม (Multinomial Logistic Regression) ดังสมการ

$$\log(\pi_i/\pi_j) = \beta_{j0} + \beta_{j1}x_1 + \dots + \beta_{jp}x_p$$

โดยที่ J แทน จำนวนกลุ่มของตัวแปรตามซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่ม, p แทน จำนวนตัวแปรอิสระ ($p = 1, 2, \dots, 10$) และ $j = 1, \dots, J - 1$

2. การจำลองข้อมูลรบกวน งานวิจัยนี้ศึกษาข้อมูลรบกวนที่เกิดอย่างไม่เป็นอิสระโดยขึ้นอยู่กับทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรตามเอง โดยมีกลไกการเกิดข้อมูลรบกวนแบบ NNAR (Noise Not At Random) โดยจะเกิดเมื่อข้อมูลมีความใกล้เคียงกับชุดข้อมูลในอีกกลุ่ม จึงอยู่บริเวณขอบของกลุ่ม หากจะจำลองข้อมูลรบกวนรูปแบบนี้ สามารถจำลองได้โดยการแทนที่ค่าของตัวแปรตามที่อยู่บริเวณขอบกลุ่มข้อมูลที่เชื่อมต่อกับชุดข้อมูลอีกกลุ่มหรือบริเวณที่ข้อมูลในกลุ่มนั้นมีความหนา

แน่นอนยเป็นค่าของอีกกลุ่ม (Moura *et al.*, 2022; Garcia *et al.*, 2019) ซึ่ง Sáez (2022) ได้ระบุว่าข้อมูลรบกวนแบบ NNAR มีลักษณะเป็น Neighborwise borderline label noise ผู้วิจัยจึงจำลองข้อมูลรบกวนในงานวิจัยนี้ให้เป็นลักษณะ Neighborwise borderline label noise โดยทำการจำลองผ่านแพ็คเกจ “noisemodel” ของโปรแกรม R ซึ่งจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ level แสดงเงื่อนไขปริมาณข้อมูลรบกวนเป็น 10%, 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ โดยจำลองข้อมูลรบกวนดังกล่าวในชุดข้อมูลเรียนรู้ (training data)

3. การจัดการข้อมูลรบกวน วิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

3.1 วิธีการขจัดข้อมูลรบกวน (remove) เป็นการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวน (noise filter) เพื่อขจัดแถวข้อมูลที่ถูกตรวจจับว่าเป็นข้อมูลรบกวนผ่านอัลกอริทึมที่แตกต่างกันของแต่ละตัวกรองออกจากชุดข้อมูลเรียนรู้ (training data) ผลที่ได้จากการขจัดทั้งแถวที่มีตัวแปรตามเป็นข้อมูลรบกวนจะทำให้ลดจำนวนชุดข้อมูลในเรียนรู้ที่จะนำไปเป็นตัวนำเข้าในกระบวนการจำแนกกลุ่มข้อมูล (Prati *et al.*, 2019) โดยตัวกรองข้อมูลรบกวนสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม similarity ที่ใช้หลักการ k-NN และระยะห่างระหว่างข้อมูลในการคัดกรอง และกลุ่ม ensemble ที่ใช้หลักการทำนายจากตัวแบบจำแนกหลายๆ ครั้ง ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกตัวกรองข้อมูลรบกวนมาศึกษาในกลุ่มละ 2 ตัวกรองรวมทั้งรวมทั้งหมด 4 ตัวกรอง ได้แก่ ในกลุ่ม similarity เลือก 2 วิธี ได้แก่ 1) CNN มีหลักการ คือ ใช้ 1-NN เพื่อหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด หากกลุ่มไม่ตรงกันจะขจัดออก และ 2) ENN มีหลักการ คือ หาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดด้วย k-NN และจะขจัดออกถ้าข้อมูลตัวนั้นมีกลุ่มแตกต่างจากเพื่อนบ้าน และในกลุ่ม ensemble เลือกวิธี 2 วิธี ได้แก่ 1) CVCF มีหลักการคือ แบ่งข้อมูลออกเป็น n folds แล้วสร้าง ต้นไม้ประเภท C4.5 ด้วย n-1 folds เพื่อทดสอบข้อมูลที่เป็นข้อมูลรบกวน และ 2) IPF มีหลักการคือ ใช้ต้นไม้ประเภท C4.5 เพื่อกำจัดชุดข้อมูลที่มีข้อมูลรบกวน โดยจะทำวนซ้ำจนกระทั่งไม่มีข้อมูลถูกกำจัดอีกต่อไป การใช้ตัวกรองข้อมูลทั้งหมดจะใช้แพ็คเกจ “NoiseFiltersR” ในโปรแกรม R

3.2 วิธีการปรับค่าตัวแปรตาม (relabel) เป็นการปรับค่าตัวแปรตามที่ถูกตรวจสอบว่าเป็นข้อมูลรบกวน ให้เป็นกลุ่มที่ถูกต้อง โดยในการศึกษาครั้งนี้มีการใช้ตัวกรองข้อมูลรบกวนจากวิธีการขจัดข้อมูลรบกวนมาเป็นวิธีในการตรวจสอบข้อมูลรบกวนหลังจากนั้นจะใช้เก็บวิธีค่าดัชนีที่ระบุการเป็นข้อมูลรบกวนไว้ แล้วลบค่าเฉพาะตัวแปรตามที่แสดงว่าเป็นข้อมูลรบกวน โดยไม่ได้ลบทั้งแถวข้อมูลเหมือนวิธีขจัดข้อมูลรบกวน หลังจากนั้นจะใช้การประมาณค่าทดแทนพหุ (multiple imputation) ในการทำนายค่าตัวแปรตาม

โดยครั้งนี้เลือกวิธีการประมาณค่าทดแทนมาใช้ร่วมกับตัวกรองข้อมูลจำนวน 3 วิธี ได้แก่ 1) polyreg วิธีนี้ใช้ประมาณค่าข้อมูลที่เป็นตัวแปรจัดประเภทที่มากกว่า 2 กลุ่มที่ไม่มีอันดับโดยใช้ตัวแบบถดถอยพหุกลุ่มในการประมาณค่าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ใช้งานผ่านแพ็คเกจ “mice” ในโปรแกรม R 2) rf เป็นวิธีที่มีการประมาณค่าโดยใช้ตัวแบบ random forest ในการทำนายข้อมูลสูญหาย โดยใช้งานผ่านแพ็คเกจ “mice” ในโปรแกรม R และ 3) mixgb เป็นวิธีที่มีการประมาณค่าโดยใช้ตัวแบบ XGBoost ในการทำนายข้อมูลสูญหาย ใช้งานผ่านแพ็คเกจ “mixgb” ในโปรแกรม R สำหรับวิธีการปรับค่าตัวแปรตามมีการใช้ตัวกรองข้อมูลจากวิธีขจัดข้อมูลรบกวน 4 วิธี ร่วมกับการประมาณค่าทดแทนพหุ จำนวน 3 วิธี จึงมีวิธีย่อยสำหรับวิธีการปรับค่าตัวแปรตามทั้งหมด 12 วิธี แสดงดัง Table 1

Table 1 Combination between noise filter and multiple imputation for relabel method.

Noise filter	Multiple imputation method		
	polyreg	rf	mixgb
CNN	CNN + polyreg	CNN + rf	CNN + mixgb
ENN	ENN + polyreg	ENN + rf	ENN + mixgb
CVCF	CVCF + polyreg	CVCF + rf	CVCF + mixgb
IPF	IPF + polyreg	IPF + rf	IPF + mixgb

4. การสร้างตัวแบบการจำแนก งานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบ มีการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นชุดข้อมูลเรียนรู้ (training data) 70% และชุดข้อมูลทดสอบ (testing data) 30% สำหรับชุดข้อมูลเรียนรู้จะมีการจำลองข้อมูลรบกวนตามวิธีการในข้อ 2 ส่วนชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ได้มีการจำลองข้อมูลรบกวน สำหรับตัวแบบจำแนกกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 4 ตัวแบบ ได้แก่ 1) k-NN เป็นอัลกอริทึมที่พิจารณาเพื่อนบ้านที่อยู่รอบๆ สำหรับการตัดสินใจว่าจะข้อมูลที่กำหนดจะอยู่ในกลุ่มใดตามเพื่อนบ้านที่อยู่ใกล้ที่สุด โดยจะพิจารณาจากระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลจากนั้นจึงทำการเลือกกลุ่มโดยยึดเสียงข้างมาก 2) Random Forest (RF) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ต้นไม้การตัดสินใจหลายๆ ครั้ง แล้วพิจารณาผลลัพธ์ การแบ่งกลุ่มโดยยึดเสียงข้างมาก 3) Naïve Bayes (NB) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการของความน่าจะเป็นจากพื้นฐานทฤษฎีของเบย์ (Bayes theorem) ซึ่งจะใช้การคำนวณความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข และ 4) Support Vector Machine (SVM) เป็นอัลกอริทึมที่แบ่ง Class ของ

ข้อมูลออกจากกัน โดยอาศัยหลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกต้องเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ โดยเน้นการหาเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ติดที่สุด สำหรับค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตัวแบบ กำหนดให้ใช้เป็นค่าเริ่มต้นของตัวแบบ

5. การประเมินประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวน จะประเมินโดยใช้ค่า F1 ของตัวแบบการจำแนกที่มีการใช้ค่าจากตาราง confusion matrix งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อการเปรียบเทียบวิธีการจัดการข้อมูลรบกวน จึงอธิบายความหมายของค่าต่างๆ ใน confusion matrix ได้ดังนี้ 1) True Positive (TP) คือ จำนวนข้อมูลที่เป็นข้อมูลรบกวน และถูกระบุว่าเป็นข้อมูลรบกวน 2) False Negative (FN) คือ จำนวนข้อมูลที่เป็นข้อมูลรบกวน แต่ถูกระบุว่าไม่เป็นข้อมูลรบกวน 3) False Positive (FP) คือ จำนวนข้อมูลที่ไม่เป็นข้อมูลรบกวน แต่ถูกระบุว่าเป็นข้อมูลรบกวน และ 4) True Negative (TN) คือ จำนวนข้อมูลที่ไม่เป็นข้อมูลรบกวน และถูกระบุว่าไม่เป็นข้อมูลรบกวน (Li & Mao, 2023; Nematzadeh et al., 2020) โดยค่าประสิทธิภาพ F1 จะคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกของ precision และ recall ดังสมการ

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$F1 = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}$$

6. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวน ทำโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายทาง (N-Way ANOVA) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย F1 ที่มีปัจจัยหลายปัจจัยพร้อมๆ กัน ได้แก่ วิธีการจัดการข้อมูลรบกวน ขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนก พร้อมทั้งดูปฏิสัมพันธ์ระหว่างวิธีการจัดการข้อมูลรบกวน กับปัจจัยอื่นๆ ในสถานการณ์ที่จำลองข้อมูลขึ้น เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบจำแนกกลุ่มข้อมูล เมื่อสถานการณ์ของขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนกกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน

ผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนในภาพรวม

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายทาง พบว่าวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนมีอิทธิพลปฏิสัมพันธ์กับทุกปัจจัย ได้แก่ ขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนกที่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ F1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีขนาดอิทธิพลที่พิจารณาจากค่า Partial eta squared () แสดงดัง Table 2

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาม Table 2 พบว่า วิธีการจัดการข้อมูลรบกวนมีอิทธิพลขนาดใหญ่ (= 0.63) ต่อค่าประสิทธิภาพ F1 กล่าวคือวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ F1 แตกต่างกันมาก โดยในภาพรวมเมื่อจัดการข้อมูลรบกวนโดยวิธีการปรับค่าตัวแปรตามมีแนวโน้มที่มีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงกว่าวิธีจัดข้อมูลรบกวนเป็นส่วนใหญ่ โดยประสิทธิภาพของแต่ละวิธีแตกต่างกันตาม Figure1 สำหรับอิทธิพลปฏิสัมพันธ์จะนำเสนอแยกกราฟประเด็นในหัวข้อถัดไป

Table 2 Comparison of the effect size from Partial eta squared for each factor influencing the F1 score.

Effect	η^2	p - value
Model	0.03	< .001
Sample size	0.01	< .001
Noise level	0.31	< .001
Noise handling	0.63	< .001
Noise handling * Model	0.01	< .001
Noise handling * Sample size	0.12	< .001
Noise handling * Noise level	0.01	< .001

เมื่อพิจารณาตาม Figure1 พบว่า วิธีย่อยของวิธีการปรับค่าตัวแปรตาม พบว่า วิธี ENN + polyreg จะมีค่ามัธยฐานของค่าเฉลี่ย F1 สูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองกลุ่ม ENN จะมีค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการที่ใช้ตัวกรองกลุ่มอื่นเมื่อพิจารณาวิธีย่อยของวิธีการจัดข้อมูลรบกวน พบว่า วิธี IPF มีค่าเฉลี่ย F1 สูงที่สุด รองลงมาคือ ENN, CVCF และ CNN ตามลำดับ

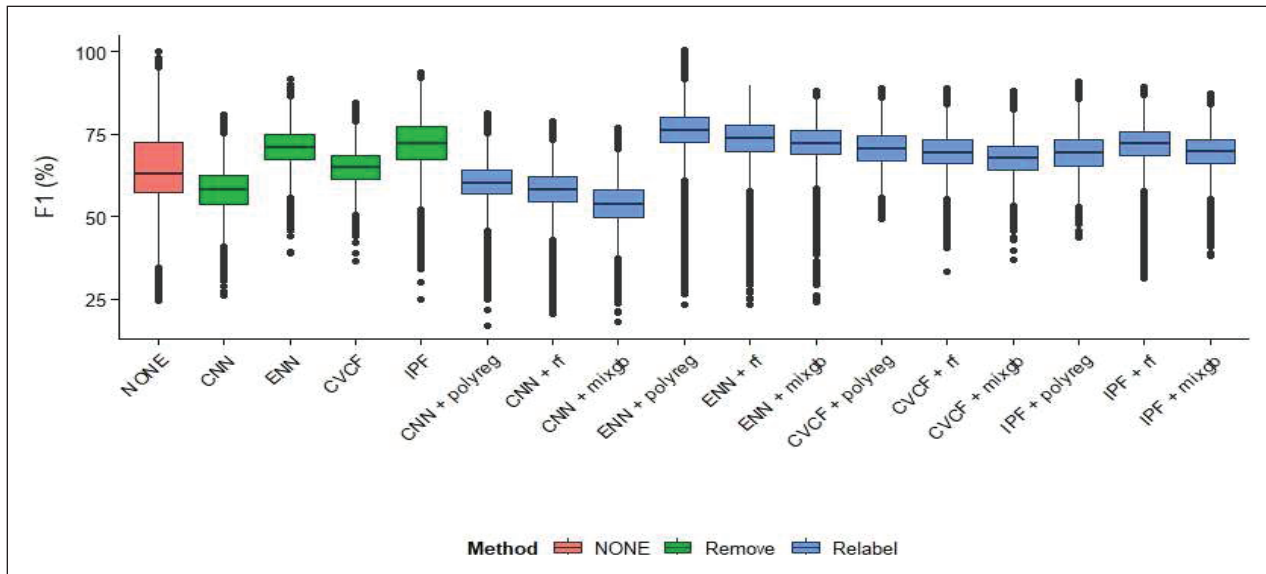


Figure 1 The average F1 score of each noise handling methods overall.

2. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนเมื่อพิจารณาพร้อมกับขนาดตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลตาม Table 2 พบว่า ปฏิสัมพันธ์ของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนกับขนาดตัวอย่าง มีอิทธิพลขนาดกลาง ($= 0.12$) ต่อค่าประสิทธิภาพ F1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($p < .001$) โดยค่าประสิทธิภาพ F1 เมื่อพิจารณาเฉพาะวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนพร้อมกับขนาดตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ 100, 500 และ 1,000 หน่วย โดยใช้ปริมาณข้อมูลรบกวนทุกระดับ และทุกตัวแบบการจำแนกแสดงดัง Table 3

กรณีขนาดตัวอย่าง 100 หน่วย พบว่า วิธีการปรับค่าตัวแปรตามส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่มีค่าเฉลี่ย F1 สูงกว่าวิธีการจัดข้อมูลรบกวน ยกเว้นวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองกลุ่ม CNN ที่มีค่า F1 ต่ำกว่าการไม่จัดการข้อมูลรบกวน โดยวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขนาดตัวอย่าง 100 หน่วย ได้แก่ ENN + polyreg รองลงมา คือ ENN + rf และ ENN + mixgb ตามลำดับ

กรณีขนาดตัวอย่าง 500 หน่วย พบว่า วิธีการปรับค่าตัวแปรตามบางวิธีและวิธีการจัดข้อมูลรบกวนบางวิธี มีแนวโน้มที่จะมีค่าประสิทธิภาพ F1 โดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองกลุ่ม CNN พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำสุด เช่นเดียวกับกรณีขนาดตัวอย่าง 100 หน่วย โดยวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขนาดตัวอย่าง 500 หน่วย ได้แก่ ENN + polyreg รองลงมา คือ IPF และ IPF + rf ตามลำดับ

กรณีขนาดตัวอย่าง 1,000 หน่วย พบว่า วิธีการจัดข้อมูลรบกวน มีแนวโน้มที่จะมีค่าเฉลี่ย F1 สูงกว่าวิธีการปรับค่าตัวแปรตามบางวิธี โดยเมื่อพิจารณาวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองกลุ่ม CNN มีประสิทธิภาพต่ำสุด เช่นเดียวกับกรณีขนาดตัวอย่าง 100 และ 500 หน่วย โดยวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อขนาดตัวอย่าง 1,000 หน่วย ได้แก่ ENN รองลงมา คือ IPF และ ENN + polyreg ตามลำดับ

Table 3 The average F1 score of each noise handling method when considering with sample size.

method		Sample size		
		n = 100	n = 500	n = 1000
None	NONE	64.61	64.75	64.80
Remove	CNN	52.57	59.18	61.53
	ENN	67.91	71.08	74.19
	CVCF	62.48	65.18	66.79
	IPF	66.22	76.15	73.96
	CNN + polyreg	60.79	60.26	59.53
Relabel	CNN + rf	58.13	58.48	57.18
	CNN + mixgb	54.19	54.39	52.60
	ENN + polyreg	79.02	76.53	72.92
	ENN + rf	76.17	72.35	71.93
	ENN + mixgb	72.52	72.87	72.07
	CVCF + polyreg	71.03	70.50	71.04
	CVCF + rf	69.48	69.96	69.39
	CVCF + mixgb	67.60	68.04	67.96
	IPF + polyreg	70.85	68.07	69.81
	IPF + rf	71.57	73.16	71.92
	IPF + mixgb	70.10	70.15	69.24

3. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนเมื่อพิจารณาพร้อมกับปริมาณข้อมูลรบกวน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาม Table 2 พบว่า ปฏิสัมพันธ์ของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนกับปริมาณข้อมูลรบกวนมีอิทธิพลขนาดเล็ก (= 0.01) ต่อค่าประสิทธิภาพ F1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($p < .001$) โดยค่าประสิทธิภาพ F1 เมื่อพิจารณาวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนร่วมกับปริมาณข้อมูลรบกวนทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยใช้ขนาดตัวอย่างทุกระดับ และทุกตัวแบบการจำแนก แสดงดัง Table 4

ค่าประสิทธิภาพ F1 เมื่อใช้วิธีการจัดการข้อมูลรบกวนในทุกวิธีมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณข้อมูลรบกวนที่เพิ่มขึ้น โดยการจัดการข้อมูลรบกวนโดยวิธีการปรับค่าตัวแปรตามมีแนวโน้มที่จะมีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงกว่าวิธีขจัดข้อมูลรบกวน ยกเว้นวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรอง CNN จะมีค่า F1 โดยเฉลี่ยต่ำกว่าการไม่จัดการข้อมูลรบกวน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันตามปริมาณรบกวนทั้ง 4 ระดับ

กรณีที่ปริมาณข้อมูลรบกวนเป็น 10% และ 20% พบว่า วิธีการที่มีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงที่สุด ได้แก่ ENN + polyreg, ENN + rf และ ENN + mixgb ตามลำดับ ซึ่งเป็นวิธีการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองข้อมูล ENN ทั้งหมด แต่เมื่อพิจารณาวิธีการขจัดข้อมูลรบกวนโดยไม่มีการปรับค่าตัวแปรตาม พบว่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวกรอง IPF จะมีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ตัวกรอง ENN เล็กน้อย

กรณีที่ปริมาณข้อมูลรบกวนเป็น 30% และ 40% พบว่า วิธีการที่มีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงที่สุด ได้แก่ ENN + polyreg, ENN + rf และ IPF ตามลำดับ ซึ่ง 2 วิธีแรกเป็นวิธีการปรับค่าตัวแปรตาม ส่วนวิธี IPF เป็นวิธีในกลุ่มของการขจัดข้อมูลรบกวน และมีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีการปรับค่าตัวแปรตามตัวอื่นๆ บางวิธี ซึ่งวิธีการทั้งปรับค่าตัวแปรตามและวิธีการขจัดข้อมูลรบกวน ในกรณีที่ปริมาณรบกวนเป็น 30% และ 40% ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่มีค่าเฉลี่ย F1 ไม่ต่างกันมากนัก ยกเว้นวิธีที่มีการขจัดข้อมูลรบกวน และปรับค่าตัวแปรตามด้วยตัวกรอง CNN

Table 4 The average F1 score of each noise handling methods when considering with noise levels.

method		Noise level			
		10%	20%	30%	40%
None	NONE	67.55	66.08	64.11	61.13
	CNN	61.50	58.70	56.15	54.70
	ENN	75.38	71.99	69.35	67.51
	CVCF	69.26	65.76	63.07	61.18
	IPF	75.81	72.68	70.67	69.27
Relabel	CNN + polyreg	65.40	60.62	58.96	55.79
	CNN + rf	63.88	57.21	55.80	54.84
	CNN + mixgb	59.65	53.45	51.83	49.99
	ENN + polyreg	81.51	76.71	75.13	71.28
	ENN + rf	79.39	73.12	71.85	69.57
Relabel	ENN + mixgb	78.18	72.38	70.57	68.82
	CVCF + polyreg	76.58	70.56	69.25	67.05
	CVCF + rf	75.06	69.45	67.96	65.97
	CVCF + mixgb	73.31	67.67	66.29	64.20
	IPF + polyreg	75.16	69.40	68.01	65.73
Relabel	IPF + rf	77.76	72.10	70.64	68.37
	IPF + mixgb	75.25	69.90	68.13	66.05

4. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนเมื่อพิจารณาพร้อมกับตัวแบบที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลตาม Table 2 พบว่า ปฏิสัมพันธ์ของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนกับตัวแบบที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูลมีอิทธิพลขนาดเล็ก ($\eta_p^2 = 0.01$) ต่อค่าประสิทธิภาพ F1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($p < .001$) โดยค่าประสิทธิภาพ F1 เมื่อพิจารณาวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนร่วมกับตัวแบบที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล ได้แก่ k-NN, Random Forest, Naïve Bayes และ Support Vector Machine โดยใช้ปริมาณข้อมูลรบกวนทุกระดับ และขนาดตัวอย่างทุกระดับ แสดงดัง Table 5

ผลการศึกษาพบว่า ในภาพรวมวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนโดยการปรับค่าตัวแปรตาม จะมีแนวโน้มที่ให้ค่าประสิทธิภาพ F1 สูงกว่าวิธีการจัดข้อมูลรบกวน เมื่อพิจารณาวิธีการปรับค่าตัวแปรตามและวิธีการจัดข้อมูลรบกวนที่มีการใช้ตัวกรอง CNN จะมีค่าประสิทธิภาพ F1 ต่ำในทุกๆ ตัวแบบ

กรณีตัวแบบ k-NN และ Random Forest พบว่า วิธีการที่มีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงที่สุดเป็นวิธีการเหมือนกัน ได้แก่ ENN + polyreg, ENN + rf และ IPF ตามลำดับ

กรณีตัวแบบ Naïve Bayes และ Support Vector Machine พบว่า วิธีการที่มีค่าประสิทธิภาพ F1 สูงที่สุดเป็นวิธีการเหมือนกัน ได้แก่ ENN + polyreg, ENN + rf และ ENN + mixgb ตามลำดับ ซึ่งเป็นวิธีการปรับค่าตัวแปรตามทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนใหญ่วิธีการปรับค่าตัวแปรตามจะมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีจัดข้อมูลรบกวน

Table 5 The average F1 score of each noise handling methods when considering with classification models.

	Method	Model			
		k-NN	RF	NB	SVM
None	NONE	65.98	64.26	63.57	65.06
Remove	CNN	57.84	58.68	56.50	58.03
	ENN	72.46	73.12	69.37	69.28
	CVCF	65.16	65.80	63.48	64.84
	IPF	73.45	74.11	70.48	70.39
	CNN + polyreg	60.73	60.90	59.08	60.07
Relabel	CNN + rf	58.69	58.99	56.43	57.61
	CNN + mixgb	53.65	55.03	52.56	53.67
	ENN + polyreg	76.29	77.48	74.94	75.93
	ENN + rf	73.96	74.45	72.08	73.43
	ENN + mixgb	73.02	73.48	71.24	72.22
	CVCF + polyreg	71.23	71.83	69.59	70.79
	CVCF + rf	70.00	70.62	68.31	69.50
	CVCF + mixgb	68.39	68.79	66.48	67.81
	IPF + polyreg	69.91	70.71	68.23	69.46
	IPF + rf	72.66	73.16	70.82	72.22
	IPF + mixgb	70.37	70.79	68.49	69.68

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามของตัวแบบจำแนกกลุ่มข้อมูลเมื่อมีสถานการณ์ของขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนกกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกันพบว่า วิธีการจัดการข้อมูลรบกวนมีอิทธิพลสัมพันธ์กับทุกปัจจัย ได้แก่ ขนาดตัวอย่าง ปริมาณข้อมูลรบกวน และตัวแบบการจำแนกที่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ F1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยสามารถสรุปวิธีการจัดการข้อมูลรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละสถานการณ์ได้ดัง Table 6

Table 6 Summary of the most effective class noise handling methods for each situation.

	Situation	Method
Sample size	100	ENN + polyreg
	500	ENN + polyreg
	1,000	ENN
Noise level	10%	ENN + polyreg
	20%	ENN + polyreg
	30%	ENN + polyreg
	40%	ENN + polyreg
Model	k-NN	ENN + polyreg
	RF	ENN + polyreg
	NB	ENN + polyreg
	SVM	ENN + polyreg

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันกับขนาดตัวอย่าง พบว่าหากกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก ($n=100$) วิธีการปรับค่าตัวแปรตามมีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีจัดข้อมูลรวมกัน หากกลุ่มตัวอย่างขนาดกลาง ($n=500$) ประสิทธิภาพของวิธีปรับค่าตัวแปรตามส่วนใหญ่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับวิธีการจัดข้อมูลรวมกัน และเมื่อกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n=1,000$) การจัดข้อมูลรวมกันมีแนวโน้มที่จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า โดยวิธีการที่มีแนวโน้มมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับตัวอย่างขนาดเล็กและกลาง คือ ENN + polyreg และสำหรับตัวอย่างขนาดใหญ่ คือ ENN จะเห็นว่าหากกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กการจัดข้อมูลรวมกันจะทำให้สูญเสียข้อมูลที่จะนำไปเรียนรู้และชุดข้อมูลขนาดเล็กอาจจะทำให้เกิดปัญหา overfitting ได้ นอกจากนี้ในงานวิจัย Rajput *et al.* (2023) ยังพบว่าตัวแบบบางตัวแบบมีประสิทธิภาพไม่ดีหากกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก ดังนั้น วิธีการปรับค่าตัวแปรตามจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าสำหรับกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันกับปริมาณข้อมูลรวมกัน พบว่า ประสิทธิภาพ F1 เมื่อใช้วิธีการจัดการข้อมูลรวมกันในทุกวิธีมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณข้อมูลรวมกันที่เพิ่มขึ้น และวิธีการจัดการที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกระดับปริมาณข้อมูลรวมกัน คือวิธีการปรับค่าตัวแปรตาม ENN + polyreg แต่หากพิจารณาวิธีการจัดข้อมูลรวมกันเพียงอย่างเดียว ตัวกรอง IPF จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวกรอง ENN แสดงให้เห็นว่าควรพิจารณาประสิทธิภาพของตัวกรองร่วมกับวิธีการประมาณค่าทดแทนพหุด้วย ซึ่งจะ เป็นข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ Luengo *et al.* (2021) ที่พบว่า หากมีการใช้ตัวกรองแบบผสมการเลือกตัวกรองหลักที่มีประสิทธิภาพได้ไม่เป็นการบอกว่าประสิทธิภาพของการจัดการกับข้อมูลรวมกันครั้งนั้น จะดีเสมอไปควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพของวิธีการอื่นๆ ที่นำมาใช้ร่วมกันด้วย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันกับตัวแบบที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล พบว่า ในภาพรวมวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันโดยการปรับค่าตัวแปรตามจะมีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพ F1 สูงกว่าวิธีการจัดข้อมูลรวมกันเล็กน้อย และวิธีการจัดการที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกตัวแบบที่ใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล คือวิธีการปรับค่าตัวแปรตาม ENN + polyreg

จากผลการศึกษาได้ข้อสรุปถึงประสิทธิภาพของวิธีการ ENN + polyreg ที่มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพ F1 สูงสุดในเกือบทุกสถานการณ์ ยกเว้นกรณีที่กลุ่มตัวอย่างเป็น 1,000 หน่วย โดยวิธีการนี้เป็นการปรับค่าตัวแปรตามโดยใช้ตัวกรอง

ENN ในการตรวจสอบข้อมูลรวมกัน ที่มีหลักการคือ ตรวจสอบข้อมูลที่มีค่าเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดหากค่าตัวแปรตามไม่ตรงกัน จะดำเนินการขจัดออก ผลของการใช้ตัวกรอง ENN แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่มีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้ร่วมกับวิธีประมาณค่าทดแทนพหุในสถานการณ์ของงานวิจัยนี้ที่มีข้อมูลรวมกันแบบ NNAR ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sáez *et al.*, 2013) ที่พบว่าการใช้ตัวกรอง ENN และตัวกรองอื่นที่พัฒนามากจาก ENN จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวกรองกลุ่มอื่นๆ ส่วนวิธีการที่มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพต่ำสุด คือ การใช้ตัวกรอง CNN ทั้งในการจัดข้อมูลรวมกันและวิธีการปรับค่าตัวแปรตาม ที่ถึงแม้จะมีหลักการพื้นฐานที่ใช้หลักการ k-NN และระยะห่างระหว่างข้อมูล แต่อัลกอริทึมนี้จะลดขนาดของชุดข้อมูลลงให้เล็กที่สุดโดยใช้ 1-NN และมักจะใช้สำหรับการลดข้อมูลที่ไม่ให้สารสนเทศ คงเหลือเฉพาะข้อมูลที่สำคัญ (Sutton, 2012) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกรองข้อมูลรวมกันแบบ NNAR นี้ที่ข้อมูลในแต่ละกลุ่มจะมีความใกล้เคียงกัน

สำหรับข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป สามารถขยายขอบเขตการศึกษาในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันด้วยการปรับค่าตัวแปรตามที่มีการใช้ตัวกรองข้อมูลรวมกันกับวิธีการประมาณค่าทดแทนพหุวิธีอื่นๆ ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษาในครั้งนี้พร้อมทั้งศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวกรองข้อมูลรวมกันและวิธีประมาณค่าทดแทนพหุ และควรเพิ่มเติมถึงวิธีการจัดการข้อมูลรวมกันในข้อมูลรวมกันแบบ NCAR และ NAR เพื่อขยายองค์ความรู้ในการจัดการข้อมูลรวมกันนอกเหนือจากที่ได้ศึกษาไป

เอกสารอ้างอิง

- Brodley, C. E., & Friedl, M. A. (1999). Identifying mislabeled training data. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11, 131–167. <https://doi.org/10.1613/jair.606>
- Buczak, P., Chen, J. J., & Pauly, M. (2023). Analyzing the effect of imputation on classification performance under MCAR and MAR missing mechanisms. *Entropy*, 25(3), Article 521. <https://doi.org/10.3390/e25030521>
- Deng, Y., & Lumley, T. (2024). Multiple imputation through xgboost. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 33(2), 531–549. <https://doi.org/10.1080/10618600.2023.2252501>
- Frénay, B., & Verleysen, M. (2013). Classification in the presence of label noise: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 25(5), 845–869. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2013.2292894>

- Garcia, L. P., Lehmann, J., de Carvalho, A. C., & Lorena, A. C. (2019). New label noise injection methods for the evaluation of noise filters. *Knowledge-Based Systems*, 163, 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.09.031>
- Hassan, H., Ahmad, N. B., & Anuar, S. (2020, May). Improved students' performance prediction for multi-class imbalanced problems using hybrid and ensemble approach in educational data mining. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529(5), Article 052041. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/5/052041>
- Kim, Y., Soyata, T., & Behnagh, R. F. (2018). Towards emotionally aware AI smart classroom: Current issues and directions for engineering and education. *IEEE Access*, 6, 5308–5331. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2791861>
- Li, C., & Mao, Z. (2023). A label noise filtering method for regression based on adaptive threshold and noise score. *Expert Systems with Applications*, 228, Article 120422. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120422>
- Li, P., Stuart, E. A., & Allison, D. B. (2015). Multiple imputation: A flexible tool for handling missing data. *JAMA*, 314(18), 1966–1967. <https://doi.org/10.1001/jama.2015.15281>
- Luengo, J., Sanchez-Tarrago, D., Prati, R. C., & Herrera, F. (2021). Multiple instance classification: Bag noise filtering for negative instance noise cleaning. *Information Sciences*, 579, 388–400. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.07.076>
- Miao, Q., Cao, Y., Xia, G., Gong, M., Liu, J., & Song, J. (2015). RBoost: Label noise-robust boosting algorithm based on a nonconvex loss function and the numerically sTable base learners. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 27(11), 2216–2228. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2015.2475750>
- Miller, D., & Soh, L.-K. (2013). Meta-reasoning algorithm for improving analysis of student interactions with learning objects using supervised learning. In S. K. D'Mello, R. A. Calvo, & A. Olney (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Educational Data Mining* (pp. 129–135). International Educational Data Mining Society. https://educationaldatamining.org/files/conferences/EDM2013/papers/paper_6.pdf
- Moura, K. G., Prudêncio, R. B., & Cavalcanti, G. D. (2022). Label noise detection under the noise at random model with ensemble filters. *Intelligent Data Analysis*, 26(5), 1119–1138. <https://doi.org/10.3233/IDA-215980>
- Nematzadeh, Z., Ibrahim, R., & Selamat, A. (2020). Improving class noise detection and classification performance: A new two-filter CNDC model. *Applied Soft Computing*, 94, Article 106428. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106428>
- Nguyen-Van, T. (2020). A discrete-time state estimation for nonlinear systems with noises. *IEEE Access*, 8, 147089–147096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014377>
- Nicholson, B., Sheng, V. S., & Zhang, J. (2016). Label noise correction and application in crowdsourcing. *Expert Systems with Applications*, 66, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.09.003>
- Prati, R. C., Luengo, J., & Herrera, F. (2019). Emerging topics and challenges of learning from noisy data in nonstandard classification: A survey beyond binary class noise. *Knowledge and Information Systems*, 60(1), 63–97. <https://doi.org/10.1007/s10115-018-1244-4>
- Rajput, D., Wang, W. J., & Chen, C. C. (2023). Evaluation of a decided sample size in machine learning applications. *BMC Bioinformatics*, 24(1), Article 48. <https://doi.org/10.1186/s12859-023-05156-9>
- Sáez, J. A. (2022). Noise models in classification: Unified nomenclature, extended taxonomy and pragmatic categorization. *Mathematics*, 10(20), Article 3736. <https://doi.org/10.3390/math10203736>
- Sáez, J. A., Galar, M., Luengo, J., & Herrera, F. (2013). Tackling the problem of classification with noisy data using multiple classifier systems: Analysis of the performance and robustness. *Information Sciences*, 247, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.06.002>
- Sáez, J. A., Krawczyk, B., & Woźniak, M. (2016). On the influence of class noise in medical data classification: Treatment using noise filtering methods. *Applied Artificial Intelligence*, 30(6), 590–609. <https://doi.org/10.1080/08839514.2016.1193719>
- Schafer, J. L., & Graham, J. W. (2002). Missing data: Our view of the state of the art. *Psychological Methods*, 7(2), 147–177. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.7.2.147>

- Sun, Y., Li, J., Xu, Y., Zhang, T., & Wang, X. (2023). Deep learning versus conventional methods for missing data imputation: A review and comparative study. *Expert Systems with Applications*, 227, Article 120201. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120201>
- Sutton, O. (2012). *Introduction to k nearest neighbour classification and condensed nearest neighbour data reduction* [Lecture notes]. Department of Mathematics, University of Leicester.
- Van Buuren, S., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). mice: Multivariate imputation by chained equations in R. *Journal of Statistical Software*, 45(3), 1–67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>
- Zhang, J., & Cui, S. (2023). Investigating the number of Monte Carlo simulations for statistically stationary model outputs. *Axioms*, 12(5), Article 481. <https://doi.org/10.3390/axioms12050481>
- Zhu, X., & Wu, X. (2004). Class noise vs. attribute noise: A quantitative study. *Artificial Intelligence Review*, 22(3–4), 177–210. <https://doi.org/10.1007/s10462-004-0751-8>

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 6 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) ฉบับที่ 2 (มีนาคม-เมษายน) ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม-มิถุนายน) ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม) ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม) ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกตัดแปลง แก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากลและนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่เรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษร่วมกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษ ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน

2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้อักษรขนาด **18 pt.** ตัวหนา

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ให้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวปกติ

3.3 หัวข้อหลักให้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวหนา

3.4 หัวข้อรองให้อักษรขนาด **14 pt.** ตัวหนา

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt.** ตัวบาง ซึ่งบทคัดย่อควรประกอบด้วย เนื้อหา 5 ส่วน คือ 1) ที่มาของปัญหาการวิจัย 2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3) วิธีการศึกษาโดยย่อแต่ครอบคลุมรายละเอียด 4) ผลการวิจัย 5) สรุปและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ จำนวนคำไม่เกิน 350 คำ

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ให้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้พิมพ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ “.doc” (MS Word) และ “.pdf” (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

6. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)

7. การส่งบทความ ส่ง online ผ่านระบบ ThaiJo โดยสามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ www.scjmsu.msu.ac.th

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช่คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้พิมพ์ [Author (s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงบรรณของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

บทคัดย่อ (Abstract) เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 350 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาที่ผ่านมา

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods) ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งที่มาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปรผล

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อน และมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้พิมพ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams) ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ www.scjmsu.msu.ac.th

เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). *ชื่อเรื่อง* (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒิ. (2547). *หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่*. ปิติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, เลขของปีที่ (เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /<https://doi.org/เลขdoi>

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วารสาร
ครุศาสตร์, 18 (2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ในชื่อบรรณานุกรม (บ.ก.), ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชรภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษา
โดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนาวาสี (บ.ก.), การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการ
และเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ (น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

ชื่อสกุล. (ปี, /วัน/เดือน). ชื่อคอลัมน์. ชื่อหนังสือพิมพ์, เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เติลนิวิส์ว่าไรต์: 'สื่อพิพธภัณฑ์' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต.
เติลนิวิส์, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

ชื่อ สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). URL

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี. http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73hVYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Instruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are **Accepted** from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be **Revised** as appropriate to the standard. The manuscript must be interesting topic, review knowledge, modern knowledge, and academic comments that are beneficial to readers. The journal publishes 6 issues a year. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December).

Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. The use of Thai language adheres to the principles of vocabulary, transliteration in English according to the principles of the Royal Society of Thailand. Manuscript should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. Mixing Thai and English should be avoided except for the case of necessity, such as academic vocabulary with no translation or mixing words for easier understanding. English vocabulary written in Thai must use all lowercase except for unique names. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscript should be on A4 standard size paper. Each side must have 1" margins with 2 columns.

3. Browallia New font is required with font size as follows:

3.1 Title of the article: **18 pt. Bold**

3.2 Name (s) of the authors: **16 pt. Unbold**

3.3 Main Heading: **16 pt. Bold**

3.4 Sub-heading: **14 pt. Bold**

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**, The abstract should consist of 5 parts: 1) the origin of the research problem, 2) the objectives of the research, 3) a brief but detailed study method, 4) the research results, 5) a conclusion and guidelines for use.

3.6 Footnotes for authors and their affiliations: **12 pt. Unbold**, must be cited at the bottom of the first page. Academic position and corresponding author must be added at footnotes.

4. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" and ".pdf" (Portable Document Format)

5. The number of pages are limited to 12 pages, including references, Tables, graphs, or pictures.

6. Types of manuscripts: research articles and review articles.

7. Manuscript submission: online submission via www.scjmsu.msu.ac.th.

8. Manuscript with uncorrected format will be sent back to the author before review process which can delay the publication process.

Research article / review article must be in sequence as follows:

Title: denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

Name (s) of the author (s): denoted with affiliation must be in Thai and English, academic position must be specified, and email address for contact the author.

Abstract: This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **350 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

Keywords: Give 4-5 concise words to specify your article

Introduction: This section is the initial part of the article, contain information about background, reasons, purposes, and review section.

Materials and Methods: A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation

Results: Present the output. Li the information in complicated, add Tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

Discussion and Conclusion: Discuss how the results are relevant/oppose to the objective and hypothesis. How the result is different/relevant when comparing to the former findings. Give us your reason why result is like that base on reliable researches. This part should end with suggestions for research utilization or providing questions for future studies.

Tables, figures, diagrams: Selected only necessary objects to insert in the body of manuscript in accordance with the description in the text. The short description is required in English with completely meaningful. For figures and diagrams, the description is below the picture. But, for Table, the description is on top of the Table.

Acknowledgement: the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

References: listed and referred in APA.

Reference are written in “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. Book

Mertens, D.M. (2014). *Research and evaluation in education and psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods* (4th ed.). SAGE.

2. Academic Journal

Herbst-Damm, K.L., & Kulik, J.A. (2005). Volunteer support, marital status, and the survival times of terminally ill patients. *Health Psychology*, 24, 225-229. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.24.2.225>

3. Conference Proceeding

Katz, I., Gabayan, K., & Aghajan, H. (2007). A multi-touch surface using multiple cameras. In J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, & P. Scheunders (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4678. Advanced concepts for intelligent vision systems* (pp. 97-108). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2_9

4. Newspaper / Online Newspaper

Brody, J.E. (2007, December 11). Mental reserves keep brain agile. *The New York Times*. <http://www.nytimes.com>

5. E-book

Dahlberg, G., & Moss, P. (2005). *Ethics and politics in early childhood education*. <https://epdf.tips/ethics-and-politics-in-early-childhoodeducation-contesting-early-childhood.html>

Aim and Scope:

The Journal of Science and Technology aims to disseminate of scientific knowledge in the discipline of Mathematics, Science, Technology, Engineering, Agriculture, Medicine, Health Science, Interdisciplinary in science and technology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership

Maharakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-distict, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4371 9827 ext. 1754

Advisors

President of Maharakham University
Professor Dr.Visut Baimai
Professor Dr.Vichai Boonsaeng
Professor Dr.Peerasak Srinives

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

Professor Dr.Pairot Pramual
Maharakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Maharakham University
Professor Dr.Anongrit Kangrang
Maharakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Maharakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Maharakham University
Associate Professor Dr.Orawich Goompol
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Maharakham University

Editorial Board

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University
Professor Dr.Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Wongsa Laohasiriwong
Khon Kaen University
Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul
Khon Kaen University

Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chawalit Boonpok
Maharakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Nakhon Phanom University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Walaiporn Tongjaroenbuengam
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Maharakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation
and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Janloy
Jirarat Puseerit

Six issues per year

Number 1 January-February
Number 2 March-April
Number 3 May-June
Number 4 July-August
Number 5 September-October
Number 6 November-December

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 44 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน 2568

ISSN (Print) : 2985-2617
ISSN (Online) : 2985-2625

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN

