

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 45 Number 3 May - June 2026

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 ใบไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิชญ์ กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละออศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อ่านเปรื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงศ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรวรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณฐพล ภูมิพันธุ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วลัยพร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เภสัชกร ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม

เลขานุการ
ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ
พักตร์วิไล จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสีฤทธิ์

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

ท่านผู้อ่านวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่าน ในสภาวการณ์ปัจจุบัน โลกกำลังเผชิญปัญหาหลากหลายด้าน ทั้งประเด็นความขัดแย้งทางภูมิรัฐศาสตร์ ซึ่งส่งผลกระทบในด้านต่างๆ ต่อประชาชนอย่างกว้างขวาง นอกเหนือจากประเด็นปัญหาดังกล่าว ในด้านสภาวะแวดล้อมปัจจุบันยังมีความกังวลถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเด็นเกี่ยวกับปรากฏการณ์ “El Niño” ที่อาจทวีความรุนแรงเป็น “Super El Niño” ซึ่งจะสร้างความผันผวนปรวนแปรของสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนได้อย่างรุนแรง ดังนั้นการเตรียมการเพื่อรับมือกับผลกระทบจากปรากฏการณ์นี้ จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

การศึกษาวิจัยในมิติต่างๆ เป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการรับมือกับปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับนี้ นำเสนอผลงานวิจัยที่มีความน่าสนใจในหลากหลายสาขาวิชา ในจำนวนนี้มีผลงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับมูลค่าของทรัพยากรชีวภาพ โดยการศึกษาของ นรันต์ รัฏฐารมณ์ และคณะ ที่ประเมินมูลค่าของหอยเสียบ (ภาพปก) ในพื้นที่หาดม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของหอยชนิดนี้ในแง่ทางเศรษฐศาสตร์ต่อประชาชนในพื้นที่ นอกเหนือจากงานวิจัยเรื่องนี้ ยังมีผลงานวิจัยเรื่องอื่นๆ ที่น่าสนใจในสาขาด้านการเกษตร ชีววิทยา เทคโนโลยีสารสนเทศ และวิศวกรรมศาสตร์ ผลงานทุกเรื่องได้ผ่านกระบวนการประเมินคุณภาพโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ผลงานวิจัยที่นำเสนอผ่านวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับนี้ จึงมีความสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เพื่อขับเคลื่อนการพัฒนาของประเทศตลอดจนการเตรียมการสำหรับรองรับการเปลี่ยนแปลงของโลกในมิติต่างๆ ต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
ผู้ช่วยบรรณาธิการ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สารบัญ

Agricultural Science

ผลของการทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำ (Wolffia arrhiza (L.)) อบแห้งในส่วนฝาของผลิตภัณฑ์มาการอง 287

Effect of substitution of almond powder with dried watermeal (Wolffia arrhiza (L.)) in macaron shells

วัลลภา โพธาสินธ์, สราวุธ เนียรวิฑูรย์, อชิรญาณ์ รงค์ทอง และเสาวณีย์ หลีเกื้อ

Wanlapa Potasin, Sarawoot Nienvitoon, Achiraya Rongthong and Saowanee Leekear

Biological Science

การสกัดและการทำให้บริสุทธิ์ของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตชนิดสายโซ่กลางที่ผลิตโดย *Streptomyces* sp. โดยใช้เอนไซม์และระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค 298

Extraction and purification of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates produced by *Streptomyces* sp. using enzymes and an aqueous two-phase system

พรทิพพา พิญญาพงษ์ และสมใจ เขียวสดใส

Porntippa Pinyaphong and Somjai Khiewsodsai

ความชุกและความแปรผันทางพันธุกรรมของเชื้อไวรัสพาร์โวในแมวที่พบในภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย 308

Prevalence and genetic variation of Feline Parvovirus (FPV) infection in the central and eastern regions of Thailand

สมชาย โสมย์ไพศาลศิลป์, ศิริลักษณ์ มีสุวรรณ, ทิพวัลย์ จันทะฟอง และปัทมา มุฑฒิ

Somchai Sompaisarnsilp, Sirilak Mesuwan, Tippawan Jantafong and Pattama Mutthi

ปริมาณและมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบบริเวณหาดม่วงงาม ตำบลม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา 319

Quantity and harvesting value of wedge clams (*Donax* spp.) at Muang Ngam Beach, Muang Ngam Subdistrict, Singhanakhon District, Songkhla Province

นรันต์ ณัฏฐารมณ์, กริ่งผกา วังกุลางกูร และเสาวลักษณ์ รุ่งตะวันเรืองศรี

Narun Nattharom, Kringpaka Wangkulangkul, and Saowalak Roongtawanreongsri

ผลของสารสกัดน้ำจากใบหูกวางต่อเชื้อ *Staphylococcus aureus* ภายใต้ความแตกต่างของความเข้มข้นและระยะเวลาการสัมผัส 329

Effects of Indian almond leaf aqueous extract on *Staphylococcus aureus* in relation to concentration and exposure time

จิราภา รุ่งเรืองสาคร, กัญจน์ กาญจนเจริญ, ณัฐนรี แก้วศิริ และสิทธิชน รัตนจันทร์

Jirapa Rungreangsakhon, Gun Kanchanacharoen, Natnaree Kaewsiri and Sitthichon Rattanachan

Computer and Information Technology

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันสำหรับการจำแนกสายพันธุ์ข้าวด้วยตัวดำเนินการพรีวิทท์ที่ปรับแต่งเฉพาะ 337

Enhancing the efficiency of a convolutional neural network model for rice variety classification using a customized prewitt operator

เจษฎา สิงห์ทองชัย, สุทธิพงษ์ คล่องดี และณัฐวุฒิ ศรีวิบูลย์

Jatsada Singthongchai, Suttipong Klongdee and Nattavut Sriwiboon

การเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกโดยใช้วิธีเบส์เซียนและวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน 348

A comparison of independent variable selection in a logistic regression model using Bayesian variable selection and stepwise regression

กานต์ณัฐ ณ บางช้าง, ภัทรภร ศรีสด, เมธาพร สารศรี และภูริภัทร สุขสี

Kannat Na Bangchang, Phattharaphon Srisod, Methapohn Sarasri and Phuripat Suksee

สารบัญ

การจำแนกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบผสมผสาน 357
Cashew nut size classification using hybrid learning techniques
ภวัต ฉิมเล็ก, ธงรบ อักษร, เสกสรรค์ ศิวิลัย และสุธาสินี จิตต์อนันต์
Pawat Chimlek, Thongrob Auxsorn, Sakesan Sivilai and Sutasinee Jitanan

การจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง 366
Classification of offences in narcotic cases using machine learning
สุทัศน์ แท่นทอง และวรัญญา ปุณณวัฒน์
Suthat Tanthong and Waranya Poonnawat

การวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อระบุบุคคลไทยที่มีความเสี่ยงสูงต่อความรุนแรงในครอบครัวและปัญหาสุขภาพจิต โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง 378
Data clustering analysis to identify high-risk Thai individuals for domestic violence and mental health problems using machine learning
วุฒิพงษ์ เขื่อนดิน และชนิดา แก้วเพชร
Wutthiphong Khuandin and Chanida Kaewphet

การสกัดคุณลักษณะด้วย CNN ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าเพื่อการระบุลักษณะทางสัณฐานของอะแคนทามีบาแบบอัตโนมัติ 389
Pre-trained CNN-based feature extraction for automatic morphological identification of *Acanthamoeba* spp.
ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ, ธิติพร ประมวน, ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์ และพชร ตั้งตระกูลวงศ์
Srisupang Thewsuwan, Thitiporn Pramoun, Theekapun Charoenpong and Potchara Tangtragulwong

Engineering

ผลของความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองและพัดลมดูดอากาศต่อประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองด้วยเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ 400
Effects of filter motor speed and air suction fan speed on dust reduction efficiency using a solar-powered air purifier
สถาพร ทองวิค, ประภาพร ประเสริฐพงค์ และอภิสิกธิ์ ภักดีแก้ว
Sataporn Tongvic, Prapaporn Prasertpong and Aphisik Pakdeekaew

ผลของการทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำ (Wolffia arrhiza (L.)) อบแห้งในส่วนฝาของผลิตภัณฑ์มาการอง

Effect of substitution of almond powder with dried watermeal (Wolffia arrhiza (L.)) in macaron shells

วัลลภา โพธาสินธ์[1], สราวุธ เนียรวิฑูรย์[1], อชิรญาณ์ รงค์ทอง[1*] และเสาวณีย์ หลีเกื้อ[2]

Wanlapa Potasin[1], Sarawoot Nienvitoon[1], Achiraya Rongthong[1*] and Saowanee Leekear[2]

Received: 5 March 2025 ; **Revised:** 15 May 2025 ; **Accepted:** 24 June 2025

บทคัดย่อ

ไข่ผำเป็นแหล่งอาหารทางเลือกจากพืชท้องถิ่นที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และประเมินการยอมรับของผู้บริโภค โดยเริ่มต้นจากการคัดเลือกสูตรพื้นฐานมาการองจำนวน 3 สูตร นำไปทดสอบ การยอมรับด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม จากผู้บริโภคจำนวน 50 คน ด้วยวิธี 9-point hedonic scale จากนั้นนำสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดมาศึกษาหาอัตราส่วนของไข่ผำที่เหมาะสม โดยนำ ไข่ผำอบแห้งมาทดแทนอัลมอนด์ป่นในมาการองสูตรพื้นฐาน 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เพื่อศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และประเมินการยอมรับของผู้บริโภค สูตรที่ได้รับคะแนนการยอมรับสูงสุดจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน ผลการทดลองพบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ระดับร้อยละ 5 มากที่สุด โดยมีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.4±1.4, 7.4±1.1, 7.2±1.6, 6.7±1.5, 6.6±1.7 และ 7.1±1.7 ตามลำดับ ด้านคุณภาพทางกายภาพ พบว่ามีค่าความสว่าง (L*) 70.79±0.74 ค่าความเป็นสีแดง (a*) 1.52±0.17 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) 12.90±0.41 ด้านคุณภาพทางเคมีมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เท่ากับ 0.70±0.02 สำหรับองค์ประกอบทางโภชนาการประกอบด้วย ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้า เท่ากับร้อยละ 13.02±0.20, 7.84±0.03, 24.49±0.01, 1.14±0.06 และ 1.42±0.01 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไข่ผำ, มาการอง, อัลมอนด์ป่น

Abstract

Watermeal is a highly nutritious alternative food source derived from local plants. This research aimed to study formula and production process of substitution of almond powder with dried watermeal in macaron shells, investigate their physical and chemical qualities, and evaluate consumer acceptance. Three basic macaron formulas were selected and tested for consumer acceptance based on appearance, color, odor, taste, texture and overall liking by 50 consumers using a 9-point hedonic scale. The most accepted basic formula was chosen to determine the optimal ratio of watermeal substitution. Almond powder in the basic formula was substituted with dried watermeal at five levels: 0%, 2.5%, 5%,

[1] อาจารย์, สาขาวิชาศิลปะและเทคโนโลยีการประกอบอาหาร, วิทยาลัยการท่องเที่ยวและอุตสาหกรรมการบริการ, มหาวิทยาลัยรังสิต

[2] ผู้ช่วยอาจารย์, สาขาวิชาศิลปะและเทคโนโลยีการประกอบอาหาร, วิทยาลัยการท่องเที่ยวและอุตสาหกรรมการบริการ, มหาวิทยาลัยรังสิต

[1] Lecturer, Culinary Arts and Technology Program, College of Tourism and Hospitality Industry, Rangsit University, Pathum

[2] Assistant Lecturer, Culinary Arts and Technology Program, College of Tourism and Hospitality Industry, Rangsit University

* Corressponding author ; E-mail : achiraya.r@rsu.ac.th

7.5% and 10%. Subsequently, these formulations were analyzed for their physical and chemical qualities, as well as consumer acceptance. The formula with the highest consumer acceptance was selected for nutritional analysis to compare with the basic formula. The results indicated that consumers gave the highest acceptance to the 5% substitution of dried watermeal in macaron shells, with average scores for appearance, color, odor, taste, texture and overall liking of 7.4 ± 1.4, 7.4 ± 1.1, 7.2 ± 1.6, 6.7 ± 1.5, 6.6 ± 1.7 and 7.1 ± 1.7, respectively. The physical qualities included a lightness value (L*) of 70.79 ± 0.74, a redness value (a*) of 1.52 ± 0.17 and a yellowness value (b*) of 12.90 ± 0.41. The chemical quality, specifically water activity (a_w), was 0.70 ± 0.02. The nutritional composition consisted of 13.02 ± 0.20% moisture, 7.84 ± 0.03% protein, 24.49 ± 0.01% fat, 1.14 ± 0.06% fiber and 1.42 ± 0.01% ash.

Keywords: Watermeal, macarons, almond powder

บทนำ

เนื่องด้วยการเติบโตของประชากรโลกเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความต้องการอาหารมากขึ้น โปรตีนเป็นหนึ่งในสารอาหารหลักที่มีความสำคัญและจำเป็นสำหรับมนุษย์ การบริโภคโปรตีนอย่างเพียงพอเป็นสิ่งสำคัญ และ จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและพัฒนาการของร่างกาย โปรตีนจากพืชจึงเป็นแหล่งทางเลือกที่ชัดเจนในการนำมาใช้แทนโปรตีนจากเนื้อสัตว์ การแสวงหาวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งอาหารชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สามารถขยายพันธุ์ได้ง่าย และรวดเร็ว สามารถเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาสั้น ๆ มีขั้นตอนการเพาะเลี้ยงที่ไม่ยุ่งยาก ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ และที่สำคัญคือมีคุณค่าทางอาหารสูง (สุขุม เร้าใจ และ สุทิน สมบูรณ์, 2550)

ไข่ผำ หรือ ไข่น้ำ (Khai phum or Khai nam) เป็นไม้ลอยน้ำที่ต้นประกอบด้วยเม็ดสีเขียว เป็นพืชดอกที่เป็นไม้น้ำซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด (อุมาพร นิยะนุช และ รัชฎา ตั้งวงค์ไชย, 2553) ในประเทศไทยมีไข่ผำ 2 ชนิด ได้แก่ *Wolffia arrhiza* (L.) Wimm. และ *Wolffia globosa* (L.) Wimm. ความแตกต่างของไข่ผำทั้ง 2 ชนิดที่พบในประเทศไทย คือ W. arrhiza มีขนาดใหญ่กว่า ผิวด้านบนค่อนข้างมีสีเขียวเข้ม ลำต้นมีลักษณะทึบแสง ส่วน W. globosa จัดได้ว่าเป็นพืชดอกที่มีขนาดเล็กมากที่สุด ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า W. arrhiza และเป็นรูปทรงกระบอกมากกว่า W. arrhiza นอกจากนี้ลำต้นยังมีลักษณะโปร่งแสงมากกว่าอีกด้วย (ภานุมาศ ทองคำ, 2562) ไข่ผำสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศโดยใช้เมล็ด และสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแตกหน่อ พบมากในระหว่างฤดูหนาวต่อกับฤดูร้อน บริเวณแหล่งน้ำนิ่งโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือของประเทศไทย (วัฒนี บุญวิทยา และคณะ, 2559) จากการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์โดยน้ำหนักแห้งของไข่ผำ พบว่า มีโปรตีนร้อยละ 6.8-45 ไขมันร้อยละ 1.8-9.2 คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 14.1-43.6 และเส้นใยอาหาร ร้อยละ 5.7-16.2 (กองโภชนาการ, 2544) นอกจากนี้ ไข่ผำยังมีองค์ประกอบของแคลเซียม 59.0 มิลลิกรัม และเบต้า- คาโรทีน 64.16 RE ในส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม (อำพรรณ ชัยกุลเสรีวัฒน์ และ ปิยมาภรณ์ เอมเสม, 2550)

จากการศึกษาของ Ruekaewma *et al*., (2015) พบว่าไข่ผำมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น ทรีโอนีน, วาลีน, เมไทโอนีน, ไอโซลูซีน, ลูซีน, เฟนิลอะลานีน, ไลซีน, ทรีโอนีน, ทริพโตเฟน, อาร์จินีน และ ฮีสทิดีน มีรายงานการวิจัยถึงฤทธิ์ทางเภสัช อาทิ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ รักษาอาการท้องผูก มีเส้นใยอาหารที่ดีต่อระบบย่อยอาหาร ฤทธิ์ต้านการติดเชื้อ และช่วยรักษาภาวะซีดในคนที่เป็นโรคโลหิตจาง ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอในร่างกาย ไข่ผำยังมีแคลเซียมช่วยให้กระดูกแข็งแรง (พิพัฒน์พงษ์ วงศ์ใหญ่ และศศิธร ชาววัลจันทึก, 2554) ไข่ผำถือเป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่ใช้ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงสั้น สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้เร็ว มีแมลงศัตรูพืชน้อย มีการขยายพันธุ์ได้รวดเร็วตามธรรมชาติที่สมบูรณ์ ทำให้ได้ผลผลิตปริมาณมาก ต้นทุนของการผลิตต่ำ คนพื้นเมืองในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือนิยมนำไข่ผำมาทำอาหารคาวและอาหารหวาน โดยปรุงให้สุกก่อนรับประทาน เนื่องจากมีแคลเซียม และเบต้าแคโรทีนสูง มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าปลา ไข่ เนื้อวัว และถั่วเหลือง (ศันศนีย์ อุตมอ่าง, 2555) ดังนั้นการใช้ไข่ผำจึงเป็นโปรตีนทางเลือกจากพืชที่สำคัญในตลาดปัจจุบันทั้งอาหารมนุษย์และสัตว์ (วนิดา ปานอุทัย, 2563)

มาการอง (Macaron) เป็นขนมหวานที่มีรูปร่างกลมเหมือนแซนด์วิชสองชิ้นประกบกัน มีไส้ตรงกลาง เป็นขนมที่มีต้นกำเนิดจากประเทศฝรั่งเศส เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1791 จัดว่าเป็นขนมประเภทเมอแรงก์ (Meringue) ชนิดหนึ่ง มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ อัลมอนด์บด น้ำตาลทราย น้ำตาลไอซิ่ง ไข่ขาว และมีการเติมสีผสมอาหาร (Wu, 2012) เป็นขนมอบที่มีลักษณะคล้ายโดมแบน ๆ ด้านนอกกรอบด้านในเหนียวนุ่ม ด้วยรสชาติที่หอมหวาน มีไส้ตรงกลางเป็นกานาช

(Ganache) มีหลายรสชาติ เช่น ช็อกโกแลต สตรอว์เบอร์รี วานิลลา อัลมอนด์ หรือผลไม้ตามฤดูกาล เป็นต้น มาการองจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยปัจจัยที่ทำให้การทำมาการองประสบความสำเร็จนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ กระบวนการทำเมอแรงก์ และการพักหน้าขนมก่อนอบ อย่างไรก็ตาม พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการทำมาการองโดยเฉพาะถั่วอัลมอนด์ เป็นวัตถุดิบที่ให้พลังงานและปริมาณไขมันสูง ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการของ อัลมอนด์ 100 กรัมให้พลังงาน 580 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรต 21.7 กรัม ใยอาหาร 12.2 กรัม ไขมัน 49.42 กรัม น้ำ 4.7 กรัม และโปรตีน 21.22 กรัม (อธิป บุญศิริวิทย์, 2556)

คณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นประโยชน์ของการนำ ไข่ผำซึ่งเป็นพืชพื้นบ้านของไทยที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะโปรตีน ใยอาหาร แคลเซียม และเบต้าแคโรทีน มาทดแทนอัลมอนด์ป่นในผลิตภัณฑ์มาการอง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น และยังเป็นการเพิ่มทางเลือกในการนำไข่ผำมาใช้ประโยชน์ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารแก่ผู้บริโภคมาการอง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ได้รับความนิยมมากในกลุ่มวัยรุ่น และกลุ่มวัยทำงาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

2) เพื่อศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และทางเคมีของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

3) เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

การทดลอง

1. การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และทางเคมีของไข่ผำ

ไข่ผำที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไข่ผำชนิด *Wolffia arrhiza* (L.) ที่ผ่านการอบแห้ง มาจาก Vitoon Farm Organic จังหวัดพิษณุโลก นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี [ค่าความสว่าง (L*), ค่าความเป็น สีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*)] ด้วยเครื่อง วัดค่าสี (Shenzhen WR-10, China) และคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่อง a_w meter (Fujian WA-160A, China) เมื่อทำการวัดคุณภาพเรียบร้อยแล้วนำไข่ผำไปบรรจุถุงอลูมิเนียมฟอยล์แล้วเก็บรักษาแบบสุญญากาศ เพื่อเตรียมนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2. การคัดเลือกสูตรพื้นฐานมาการอง

ทำการคัดเลือกสูตรมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ มาการอง 3 สูตร ดังแสดงใน Table 1 โดยมีวิธีการทำ ดังนี้

Table 1 Ingredients for macaron shells production in 3 formulas for basic formula selection.

Ingredients	Formula 1		Formula 2		Formula 3	
	g	%	g	%	g	%
1) Almonds Powder	300	25.21	300	23.94	300	24.27
2) Icing sugar	300	25.21	300	23.94	300	24.27
3) White sugar	300	25.21	300	23.94	262	21.20
4) Egg white	220	18.49	240	19.15	224	18.12
5) Water	70	5.88	113	9.03	150	12.14
Total	1,190	100	1,253	100	1,236	100

Reference : Formula 1 Herme, P. (2011).
Formula 2 José, M. (2010).
Formula 3 Christophe, F. (2015).

2.1 ขั้นตอนการผลิตฝามาการอง

ส่วนที่ 1

1) ผสมอัลมอนด์ป่น และน้ำตาลไอซิ่งให้เข้ากัน ปั่นด้วยเครื่อง food processor (MARA, Thailand) นาน 15 วินาที โดยใช้ความเร็วต่ำ

2) ร่อนอัลมอนด์ และน้ำตาลไอซิ่งที่ปั่นไว้ผ่านตะแกรงความละเอียด 40 เมช แล้วคนผสมกับไข่ขาวส่วนที่ 1 (ร้อยละ 50 ของสูตร) ให้เข้ากันดี พักไว้

ส่วนที่ 2

1) ทำน้ำเชื่อมโดยผสมน้ำตาลทราย และน้ำเปล่า คนผสมให้เข้ากัน นำไปต้มไฟกลาง

2) ตีไข่ขาวส่วนที่ 2 (ร้อยละ 50 ของสูตร) ด้วยหัวตี

ตะกร้อ โดยใช้ความเร็วปานกลางด้วยเครื่องผสมอาหาร (KitchenAid; Heavy Duty, USA.) จนกระทั่งมีลักษณะเป็นฟองฟูละเอียด ปิดเครื่อง พักไว้

3) เมื่อน้ำเชื่อมมีอุณหภูมิถึง 115 องศาเซลเซียสให้เปิดเครื่องผสมอาหารด้วยความเร็ว ปานกลาง ตีไข่ขาวอีกครั้ง รอจนกระทั่งน้ำเชื่อมมีอุณหภูมิถึง 117 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วเครื่องผสมอาหารเป็นความเร็วสูงสุด จากนั้นเทน้ำเชื่อมร้อนลงในอ่างผสมไข่ขาวที่กำลังเดินเครื่องอยู่ ตีผสมต่อไป เรื่อยๆ จนกระทั่งส่วนผสมเย็นลงเหลือ 40 องศาเซลเซียส ปิดเครื่อง

4) นำส่วนผสมส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ผสมให้ เข้ากันด้วยพายยาง

5) เมื่อผสมเข้ากันแล้ว ให้ทดสอบโดยการตักเนื้อมาการอง (Batter) ขึ้นด้วยพายยาง ยกขึ้นตรง ๆ แล้วปล่อยให้เนื้อมาการอง (Batter) ไหลกลับลงไปใน อ่างผสม เนื้อมาการอง (Batter) จะไหลลงมาทับกันไปมาจนหมด ซ้อนกันเป็นชั้นลักษณะคล้ายริบบิ้นพับทบ จับเวลา 15 วินาที เขย่าอ่างผสมเบา ๆ หากรอยพับทบของเนื้อมาการอง (Batter) เริ่มเรียบกลืนเป็นเนื้อเดียวกันภายใน 15 วินาที ถือว่าสามารถใช้ได้ แต่หากเนื้อมาการอง (Batter) ยังมีความข้น เหนียว ให้คนผสมต่อไปแล้วทำการทดสอบในขั้นตอนดังกล่าวอีกครั้ง

6) นำเนื้อมาการอง (Batter) ใส่ถุงบีบที่บรรจุด้วยหัวบีบกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร แล้วบีบลงบนกระดาษเคลือบไขรองอบบนถาดอบที่มีความเรียบ ให้เนื้อมาการอง (Batter) มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 ถึง 4 เซนติเมตร เคาะถาดอบเบา ๆ เพื่อให้หน้าของเนื้อมาการอง (Batter) เรียบ

7) วางถาดพักไว้ในบริเวณที่ไม่โดนลม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที จนกระทั่งผิวหน้าของมาการองนั้นเปลี่ยนจากที่เคยมีความเงากลายเป็นสีแบบด้านขึ้น หรือจนกระทั่งใช้นิ้วสัมผัสไปที่ผิวหน้าของมาการองแล้วไม่เหนียวติดนิ้วมือ

8) อบด้วยเตาอบไฟฟ้าชั้นเดียว (MIWE; Condo, Germany) ที่อุณหภูมิด้านบน 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านล่าง 160 องศาเซลเซียส นานประมาณ 17-18 นาที จนสุก

9) นำฝามาการองออกจากถาดรองอบพักให้เย็นสนิทบนตะแกรงเพื่อรอการใส่ไส้ต่อไป

2.2 ขั้นตอนการผลิตไส้มาการองแบบครีมเนย (Buttercream)

เตรียมส่วนผสมสำหรับไส้มาการอง (อิตาเลียนบัตเตอร์ครีม) โดยใช้สูตรของ Hoboken, (2011) ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Ingredients for Italian meringue buttercream production.

Ingredients	Quantity	
	g	%
1) White sugar	454	26.26
2) Egg white	240	13.88
3) Salted butter	907	52.46
4) Water	113	6.54
5) Vanilla flavor	15	0.87
Total	1,729	100

โดยมีวิธีทำ ดังนี้

1) หั่นเนยเป็นลูกบาศก์ขนาด 1.5 เซนติเมตร พักไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2) ทำน้ำเชื่อมโดยผสมน้ำตาลทราย และน้ำเปล่า คนผสมให้เข้ากัน นำไปต้มไฟกลาง

3) ทำเมอแรงก์ (Meringue) โดยการตีไข่ขาวด้วยหัวตีตะกร้อ โดยใช้ความเร็วปานกลางด้วยเครื่องผสมอาหาร (KitchenAid; Heavy Duty, USA.) จนกระทั่งมีลักษณะเป็นฟองฟูละเอียด ปิดเครื่อง พักไว้

4) นำเนยที่หั่นเตรียมไว้ออกมาคลายเย็นให้เนยมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

5) เมื่อน้ำเชื่อมมีอุณหภูมิถึง 115 องศาเซลเซียส ให้เปิดเครื่องผสมอาหารด้วยความเร็วปานกลาง ตีไข่ขาวอีกครั้ง รอจนกระทั่งน้ำเชื่อมมีอุณหภูมิถึง 117 องศาเซลเซียส ปรับความเร็วเครื่องผสมอาหารเป็นความเร็วสูงสุด จากนั้นเทน้ำเชื่อมร้อนลงในอ่างผสมไข่ขาวที่กำลังเดินเครื่องอยู่ ตีผสมต่อไป เรื่อย ๆ จนกระทั่งส่วนผสมเย็นลงเหลือ 25 องศาเซลเซียส

6) ทยอยใส่เนยลงในเมอแรงก์ (Meringue) แล้วตีผสมต่อไปด้วยหัวตีตะกร้อ ด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องผสมอาหารจนกระทั่งเนยขึ้นฟู โดยครีมที่ได้จะมีลักษณะสีขาวนวล จากนั้นใส่กลิ่นวานิลลาตีผสมให้เข้ากันดี พักไว้

2.3 ขั้นตอนการใส่ไส้มาการอง

1) จับคู่ฝามาการองที่เย็นแล้ว เตรียมพักไว้บนถาดรอง โดยฝาหนึ่งหงาย อีกฝาหนึ่งคว่ำ

2) บรรจุครีมเนยใส่ในถุงบีบพร้อมด้วยหัวบีบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

3) บีบครีมเนยลงบนฝามาการองที่หงายอยู่ โดยให้สัดส่วนของฝามาการองต่อครีมเนยเท่ากับ ฝา : ครีมเนย : ฝา

เท่ากับ 1 : 2 : 1 เมื่อมองด้วยตาเปล่า

4) นำฝามาการองที่คว่ำอยู่มาประกบเข้าคู่กับฝาที่บีบไส้ไว้แล้ว บีบฝามาการองเข้าหากันเบา ๆ กระทั่งครีมเนยแบนลงแล้วกระจายตัวมาที่ขอบฝานมาการองพอดี

5) วางมาการองลงบนถาดที่มีขอบถาดสูงประมาณ 4 เซนติเมตร โดยวางในลักษณะตะแคง

6) ใช้พลาสติกใสถนอมอาหารคลุมปิดถาดที่ใส่มาการองทั้งถาด

7) ทำการบ่มมาการองในตู้เย็นเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้ฝามาการองได้ดูดซับความชื้นจากไส้มาการองได้เต็มที่ก่อนนำไปทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในขั้นตอนต่อไป

2.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำมาการองทั้ง 3 สูตร ไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ตามวิธีการของ Chamber IV and Wolf (1996) ด้วยวิธี 9-point hedonic scale ช่วงคะแนน 1-9 (1 ไม่ชอบมากที่สุด, 2 ไม่ชอบมาก, 3 ไม่ชอบปานกลาง, 4 ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 เฉย ๆ, 6 ชอบเล็กน้อย, 7 ชอบปานกลาง, 8 ชอบมาก และ 9 ชอบมากที่สุด) ในกระบวนการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง เป็นการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยไม่อาศัยหลักความน่าจะเป็น (non-probability sampling) ใช้การเลือกแบบหลายขั้นตอน (multi-stage sampling) ประกอบด้วยการเลือกแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) ซึ่งคุณสมบัติของผู้เข้าร่วมการวิจัย ตามเกณฑ์คัดเข้า ได้แก่ เพศชายหรือหญิง สุขภาพดี อายุ 18-60 ปี มีความสนใจและสามารถบริโภคผลิตภัณฑ์จากไข่ผำ และไม่มีประวัติแพ้ไข่ผำหรือผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่ผำ จากนั้นใช้การเลือกแบบตามสะดวก (Convenient sampling) จำนวน 50 คน (Kemp, S.E., Hollowood, T. and Hort, J., 2009) มาการองสูตรที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุดจะถูกคัดเลือกนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3. การศึกษาอัตราส่วนปริมาณไข่ผำที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไข่ผำ โดยทดแทนอัลมอนด์ในสูตรพื้นฐานที่ถูกคัดเลือกจากข้อ 2.4 โดยทำการทดแทนไข่ผำเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 ทำการผสมส่วนผสมวัตถุดิบตามTable 3 นำตัวอย่างที่ได้ไปประเมินคุณภาพ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณไข่ผำในผลิตภัณฑ์ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด ดังนี้

3.1 ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ

ได้แก่ ค่าสี ค่าความสว่าง (L*), ค่าความเป็น สีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Shenzhen WR-10, China)

3.2 ศึกษาคุณภาพทางเคมี

ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่อง a_w meter (Fujian WA-160A, China)

3.3 ศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ได้แก่ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ตามวิธีการของ Chamber IV and Wolf (1996) ด้วยวิธี 9-point hedonic scale ช่วงคะแนน 1-9 (1 ไม่ชอบมากที่สุด, 2 ไม่ชอบมาก, 3 ไม่ชอบปานกลาง, 4 ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 เฉย ๆ, 6 ชอบเล็กน้อย, 7 ชอบปานกลาง, 8 ชอบมาก และ 9 ชอบมากที่สุด) ในกระบวนการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง เป็นการเลือกกลุ่มตัวอย่างโดยไม่อาศัยหลักความน่าจะเป็น (non-probability sampling) ใช้การเลือกแบบหลายขั้นตอน (multi-stage sampling) ประกอบด้วยการเลือกแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) ซึ่งคุณสมบัติของผู้เข้าร่วมการวิจัย ตามเกณฑ์คัดเข้า ได้แก่ เพศชายหรือหญิง สุขภาพดี อายุ 18-60 ปี มีความสนใจและสามารถบริโภคผลิตภัณฑ์จากไข่ผำ และไม่มีประวัติแพ้ไข่ผำหรือผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่ผำ จากนั้นใช้การเลือกแบบตามสะดวก (Convenient sampling) จำนวน 50 คน (Kemp, S.E., Hollowood, T. and Hort, J., 2009)

Table 3 Macaron shells production formulas, substitution of almond powder with dried watermeal in 5 levels.

Ingredients (%)	Formula				
	1	2	3	4	5
1. Dried watermeal	0	2.5	5.0	7.5	10.0
2. Almond powder	25.0	22.5	20.0	17.5	15.0
3. Icing sugar	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
4. White sugar	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
5. Egg white	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
6. Water	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Total	100	100	100	100	100

4. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

นำมาการองทั้งชิ้นที่มีการสอดไส้ครีมสูตรที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุดจากการทดลองในข้อ 3.3 ไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน และโปรตีน (AOAC, 2016)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และค่าสี วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ส่วนการวิเคราะห์การทดสอบการยอมรับ วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ และทางเคมีของไข่ผำ

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของ ไข่ผำด้านค่าสี พบว่า ไข่ผำแห้งมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 50.72±0.55 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เท่ากับ 2.90±0.48 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 13.01±0.48 คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) มีค่าเท่ากับ 0.64±0.01 ซึ่งไข่ผำอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเขียว ซึ่งมาจากคลอโรฟิลล์ในไข่ผำเป็นรงควัตถุในพืชที่ให้สีเขียวที่พบในพืชทั่วไป อุมาพร นิยะนุช และ รัชฎา ตั้งวงค์ไชย (2553) ได้รายงานว่าไข่ผำมีสารสีเขียวที่มาจากคลอโรฟิลล์โดยมีค่าเท่ากับ 30.17 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม

2. ผลการคัดเลือกสูตรพื้นฐานมาการอง

จากการศึกษาสูตรพื้นฐานมาการอง 3 สูตร โดยการประเมินคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ผลการคัดเลือกมาการองสูตรพื้นฐานดังแสดงใน Table 4 พบว่า มาการองสูตรที่ 1 ผู้บริโภคให้คะแนนประสาทสัมผัสด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.3±1.2, 7.4±1.3 และ 7.5±0.9 ตามลำดับ ส่วนคะแนนด้านกลิ่นรส ผู้บริโภคพบว่า มาการองทั้ง 3 สูตรมีค่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงคัดเลือกมาการองสูตรที่ 1 ไปพัฒนาต่อไป

Table 4 Results of sensory evaluation of macaron shells basic formula selection.

Attribute	Macaron		
	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Appearance	7.5±1.2^{ab}	6.9±1.4^{b}	7.6±1.4^{a}
Color	7.1±1.2^{b}	7.4±1.1^{a}	7.3±1.1^{ab}
Taste	7.3±1.2^{a}	7.5±1.2^{a}	6.9±1.1^{b}
Odor^{ns}	7.3±1.3	7.2±1.4	7.2±1.1
Texture	7.4±1.3^{a}	6.9±1.4^{ab}	6.8±1.4^{b}
Overall liking	7.5±0.9^{a}	7.3±1.4^{ab}	6.9±1.3^{b}

Annotation : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p\leq0.05$).

^{ns} means there is no statistical significant difference ($p>0.05$).

3. ผลการศึกษาอัตราส่วนปริมาณไข่ผำที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

จากการศึกษาสูตรพื้นฐานที่ผ่านการคัดเลือก มาศึกษาปริมาณผำที่เหมาะสมในการทดแทนอัลมอนด์ป่นในมาการองจำนวน 5 ระดับ ปริมาณไข่ผำร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 โดยมีการประเมินคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังนี้

3.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ

คุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ได้แก่ ค่าสี ค่าความสว่าง (L*), ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทน อัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 ดังแสดงใน Table 5 พบว่า ค่าสี ค่าความสว่าง (L*) ของมาการองมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไข่ผำเพิ่มมากขึ้น โดยมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าความสว่าง (L*)เท่ากับ84.23±0.02, 73.09±1.19, 70.79±0.74, 65.82±0.05 และ 41.66±0.17 ตามลำดับ เนื่องจากค่า L* เป็นค่าบ่งบอกความสว่างของผลิตภัณฑ์มีค่าตั้งแต่ 0-100 ดังนั้นเมื่อปริมาณไข่ผำในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความสว่าง (L*) ของผลิตภัณฑ์ลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) พบว่า มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 0 มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 2.07±0.06 มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่า a* หมายถึงค่าสีมีแนวโน้มไปทางสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) พบว่า มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 10 มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 16.72±0.10

การเพิ่มปริมาณไข่ผำส่งผลต่อสีของมาการอง พบว่าเมื่อปริมาณไข่ผำเพิ่มมากขึ้น สีของมาการองจะเป็นสีเขียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอภิรดา พรปัณณวิชญ์ และสุพรรณิการ์ กล่อมจอหอ (2567) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเสริมโปรตีนจากไข่ผำ พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ไม่ได้เสริมไข่ผำมีค่าสี L* เท่ากับ 64.41 ค่า a* เท่ากับ -0.49 และค่า b* เท่ากับ0.74 ตามลำดับ เมื่อเสริมไข่ผำในเส้นก๋วยเตี๋ยวพบว่า ค่าสี L* มีแนวโน้มลดลง การเสริมไข่ผำทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวมีค่าสี a* ลดลงจากชุดควบคุม เพราะค่า a* มีค่าลดลงจึงแสดงผลทำให้สีเขียวเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปรากฏคือเส้นก๋วยเตี๋ยวที่เสริมไข่ผำจะมีสีเขียวมากกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวชุดควบคุมและ การเสริมไข่ผำส่งผลให้ค่าสี b* ของเส้นก๋วยเตี๋ยวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมจึงแสดงผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เสริมไข่ผำมีสีเหลืองมากกว่าชุดควบคุม

3.2 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมี

คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผลิตภัณฑ์มาการองเสริมไข่ผำทั้ง 5 ระดับ แสดงใน Table 5 พบว่า มาการองเสริมไข่ผำที่ร้อยละ 0, 2.5 และ 5 มีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ไม่แตกต่างต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนมาการองเสริมไข่ผำที่ร้อยละ 10 มีค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) น้อยที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.66±0.01 เนื่องจากไข่ผำแห้งมีความชื้นน้อยและมีเส้นใยสูงจึงส่งผลทำให้ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยรวมของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 10 มีปริมาตรจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นลดลงและมีความสูงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ทั้งนี้ด้วยไข่ผำเป็นพืชน้ำ ซึ่งหลังจากอบแห้งแล้วจะประกอบด้วยเส้นใยอาหารอยู่ร้อยละ 5.7-16.2 (กองโภชนาการ, 2544) โดยส่วนมากเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (crude fiber) จากผนังเซลล์ของไข่ผำ (Kakanang *et al*., 2023) ซึ่งเส้นใยอาหารดังกล่าวนี้มีความสามารถในการจับตัวกับน้ำได้เป็นอย่างดี (Hengsawad, D., 2002) เมื่อทำการทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งในผลิตภัณฑ์มาการองในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ลักษณะเนื้อมาการอง (Batter) ในขณะที่บีบขึ้นรูปมีความหนืดมากขึ้นด้วยเนื่องจากเส้นใยอาหารในไข่ผำอบแห้งจับตัวกับน้ำหรือความชื้นในเนื้อมาการอง (Batter) ได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ลักษณะของเนื้อมาการอง (Batter) ที่ผสมแล้วมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เมื่อนำไปบีบขึ้นรูปจึงไม่สามารถแผ่กระจายตัวออกด้านข้างได้ตามปกติดังเช่นสูตรควบคุม ส่งผลให้ส่วนฝาของมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นมีความสูงของฝามาการองที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ผลิตได้นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณไข่ผำอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับการศึกษาของ วนิดา บุรีภักดี และคณะ (2566) ที่พบว่าการเติมผงแก่นตะวันทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นในผลิตภัณฑ์มาการองเป็นผลให้ความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาในผลิตภัณฑ์ฝามาการองในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

Table 5 Physical qualities and chemical quality of macaron substituted of almond powder with 5 levels of dried watermeal.

Quality	0%	2.5%	5%	7.5%	10%
Physical qualities					
L*	84.23±0.02^{a}	73.09±1.19^{b}	70.79±0.74^{c}	65.82±0.05^{d}	41.66±0.17^{e}
a*	2.07±0.06^{a}	1.82±0.42^{ab}	1.52±0.17^{bc}	1.18±0.07^{c}	1.99±0.26^{a}
b*	12.33±0.23^{c}	14.49±0.60^{b}	12.90±0.41^{c}	14.71±0.05^{b}	16.72±0.10^{a}
Chemical quality					
a_w	0.70±0.01^{a}	0.70±0.02^{a}	0.70±0.02^{a}	0.68±0.01^{bc}	0.66±0.01^{c}

Annotation : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p \leq 0.05$).

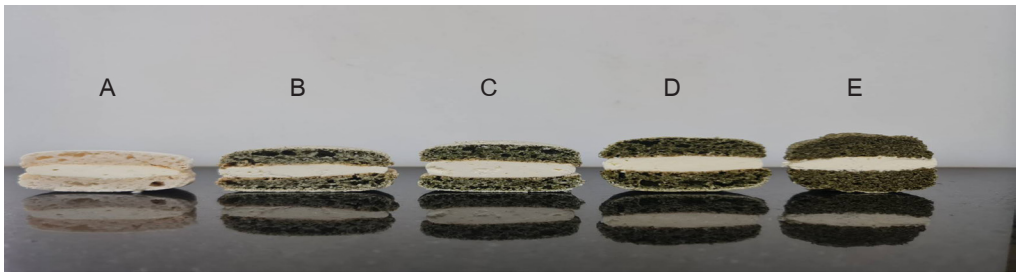


Figure 1 Characteristic of macarons substituted of almond powder with watermeal 0% (A), 2.5% (B), 5% (C), 7.5% (D) and 10% (E)

3.3 ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ดังแสดงใน Table 6 ความชอบด้านลักษณะปรากฏ พบว่า มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 5 ได้รับคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ ร้อยละ 7.5 โดยมีค่าเท่ากับ 7.4±1.4, 7.1±1.4 และ 6.7± 1.4 ตามลำดับ

ความชอบด้านสี พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยคะแนนด้านสีของผลิตภัณฑ์ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.9±1.4 และ 7.4± 1.1 ตามลำดับ ส่วนมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.1±2.1 ซึ่งผู้บริโภคระบุว่ามีสีเข้มเกินไปไม่น่ารับประทาน และไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

ความชอบด้านรสชาติ พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยคะแนนด้านรสชาติของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.8±1.7 และ 7.2±1.6 ตามลำดับ ส่วนมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.9±2.0 เนื่องจากการเติม ไข่ผำอบแห้งในปริมาณน้อยๆ ส่งผลให้รสชาติของ มาการองยังมีความหอมหวาน และอร่อยกว่ามาการองที่ที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งปริมาณมาก

ความชอบด้านกลิ่นรส พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วย ไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 ไม่แตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยคะแนนด้านกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์มาการองเสริมไข่ผำร้อยละ 2.5 และ 5 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.9±1.7 และ 6.7±1.5 ตามลำดับ ส่วนมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.7±2.1 ซึ่งผู้บริโภคระบุว่าการใช้ไข่ผำอบแห้งทดแทนอัลมอนด์ป่นที่ร้อยละ 10 มีกลิ่นเหม็นเขียวซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้บริโภคไม่พึงประสงค์

ความชอบด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วย ไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 มากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.6±1.7 เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทน อัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ยังคงเนื้อสัมผัสผิวข้างนอกกรอบ ข้างในเนื้อสัมผัสนุ่มฟูคล้ายเนื้อเค้ก

ด้านความชอบโดยรวม พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วย ไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 ไม่แตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยคะแนนด้านความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 2.5 และ 5 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.8±1.2 และ 7.1±1.7 ตามลำดับ ส่วนมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.7±2.1

ดังนั้น ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 5 มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 7.4±1.4, 7.4 ±1.1, 7.2±1.6, 6.7±1.5, 6.6±1.7 และ 7.1±1.7 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 6 ซึ่งมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 มีสีอ่อนรูปทรงสวยงาม กลิ่นหอมไข่ผำ รสชาติหวานกลมกล่อม และมีเนื้อสัมผัสดี ผิวข้างนอกกรอบ ข้างในเนื้อสัมผัสนุ่มฟูคล้ายเนื้อเค้ก จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการทำผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

ดังนั้น การทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งในผลิตภัณฑ์ปริมาณมากจะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ แต่อาจส่งผลต่อคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารได้ ซึ่งอาจส่งผลให้เนื้อสัมผัสมีลักษณะหยาบ แข็ง สีของผลิตภัณฑ์มีสีเขียวเข้มมากเกินไป อีกทั้งยังมีกลิ่นเหม็นเขียว เป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในผลิตภัณฑ์อาหาร

ซึ่งงานวิจัยมาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วย ไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 5 นี้คล้ายกับงานวิจัยของ พลอยไพริน สิทธิสาร และ วชิรพงศ์ เยาว์ฤทธิกร (2555) ที่ศึกษาเรื่องการเสริมไข่ผำในแครกเกอร์ พบว่า การเสริมสาหร่ายผำที่ร้อยละ 15 ได้รับการยอมรับจาก ผู้ทดสอบชิมในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความกรอบ) และความชอบโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 7.5, 7.7, 7.9, 7.8 และ 7.6 ซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับความชอบมาก และงานวิจัยของ กุลพร พุทธมี และ วริศชนม์ นิลนนท์ (2564) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่เสริม ผำอบแห้ง พบว่า ผลิตภัณฑ์บะหมี่สดเสริมผำร้อยละ 10 ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบมากที่สุด โดยได้คะแนนการยอมรับด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด อยู่ในระดับชอบปานกลาง

Table 6 Sensory evaluation results of macaron shells substituted of almond powder with 5 levels of dried watermeal.

Attribute	0%	10%	20%	30%	40%
Appearance	8.2±1.1^{a}	7.1±1.4^{bc}	7.4±1.4^{b}	6.7±1.4^{c}	5.2±2.2^{d}
Color	7.9±1.2^{a}	6.9±1.3^{b}	7.4±1.1^{b}	6.4±1.6^{c}	5.1±2.1^{d}
Taste	8.0±1.1^{a}	6.8±1.7^{b}	7.2±1.6^{b}	6.1±2.1^{c}	5.9±2.0^{c}
Odor	7.9±1.1^{a}	6.9±1.7^{b}	6.7±1.5^{b}	6.1±1.9^{c}	5.7±2.1^{c}
Texture	7.4±1.5^{a}	6.5±1.4^{bc}	6.6±1.6^{b}	5.4±2.1^{d}	5.9±2.2^{cd}
Overall liking	8.0±0.8^{a}	6.8±1.2^{b}	7.1±1.7^{b}	6.1±1.7^{c}	5.7±2.1^{c}

Annotation : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p\leq0.05$).

4. ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้ง

คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม แสดงใน Table 7 พบว่า ผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 มีค่าความชื้น ใยอาหาร และเถ้า มากกว่ามาการองสูตรควบคุมแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 13.02±0.20 1.14±0.06 และ 1.42±0.01 ตามลำดับ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 มีปริมาณไขมันน้อยกว่ามาการองสูตรควบคุมแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ทั้งนี้เนื่องมากจากอัลมอนด์ป่นที่เป็นวัตถุดิบหลักมีปริมาณไขมันสูงกว่าไข่ผำ โดยอัลมอนด์ 100 กรัม มีปริมาณไขมัน 49.42 กรัม (อธิป บุญศิริวิทย์, 2556) ในขณะที่ไข่ผำอบแห้ง 100 กรัม มีปริมาณไขมัน 1.8-9.2 กรัม (กองโภชนาการ, 2544) จึงทำให้มาการองสูตรควบคุมมีปริมาณไขมันมากกว่ามาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 ส่วนปริมาณโปรตีนของผลิตภัณฑ์ มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 และมาการองสูตรควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้น การใช้ไข่ผำอบแห้งแทนอัลมอนด์ป่นสามารถทดแทนปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งการใช้ไข่ผำอบแห้งทดแทนอัลมอนด์ป่นยังเป็นการเพิ่มปริมาณใยอาหารในผลิตภัณฑ์อีกด้วย ซึ่งคล้ายกับการทดลองของกุลพร พุทธมี

และ วริศชนม์ นิลนนท์ (2564) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่เสริมผำอบแห้ง พบว่า ผลิตภัณฑ์บะหมี่สดเสริมไข่ผำร้อยละ 10 พบว่า มีปริมาณโปรตีน เส้นใย และเถ้า มากกว่าผลิตภัณฑ์บะหมี่สูตรพื้นฐาน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.87±0.06 0.53±0.37 และ 2.02±0.04 และคล้ายกับงานวิจัยของวัฒนี บุญวิทยา และคณะ (2559) ที่ศึกษาผลของการเสริมไข่ผำต่อคุณภาพของช็อกโกแลต ชิฟมัฟฟิน พบว่า ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตชิฟมัฟฟินสูตรเสริมไข่ผำร้อยละ 20 มีปริมาณโปรตีน เส้นใย และเถ้า มากกว่าผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตชิฟมัฟฟินสูตรควบคุม โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 7.64±0.22, 1.56±0.33 และ 2.06±0.76 ตามลำดับ

Table 7 Comparison of the nutritional values of macaron products containing 20% watermeal and the control formula

Nutritional value	Macaron products	
(%)	Control formula	20% water meal
Moisture	12.08±0.01[b]	13.02±0.20[a]
Protein[ns]	7.85±0.11	7.84±0.03
Fat	27.11±0.04[a]	24.49±0.01[b]
Fiber	0.70±0.04[b]	1.14±0.06[a]
Ash	0.88±0.01[b]	1.42±0.01[a]

Annotation : Different letters in the same row means there is a statistically significant difference ($p \leq 0.05$).

[ns] means there is no statistical significant difference ($p > 0.05$).

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาปริมาณไข่ผำที่ใช้ทดแทน อัลมอนด์ป่นในผลิตภัณฑ์มาการอง พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งร้อยละ 5 มากที่สุด โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเฉลี่ยในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.4±1.4, 7.4±1.1, 7.2±1.6, 6.7±1.5, 6.6±1.7 และ7.1±1.7 ตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์มาการองที่ทดแทนอัลมอนด์ป่นด้วยไข่ผำอบแห้งที่ร้อยละ 5 มีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 70.79±0.74 ค่าความเป็นสีแดง (a*) เท่ากับ 1.52±0.17 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 12.90±0.41 มีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เท่ากับ 0.70±0.02 และมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 13.02±0.20, 7.84±0.03, 24.49±0.01, 1.14±0.06 และ 1.42±0.01 ตามลำดับ

จากการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้ 1) อาจนำไข่ผำมาใช้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่อื่น ๆ เช่น คุกกี้ ขนมปัง และเค้ก เป็นต้น 2) ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้มีความเหมาะสม และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กองโภชนาการ. (2544). คุณค่าอาหารส่วนที่กินได้ 100 กรัม ของผำ. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

กุลพร พุทธมี และ วริศชนม์ นิลนนท์. (2564). การพัฒนาผลิตภัณฑ์บะหมี่เสริมผำอบแห้ง. วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 16(2). 57-69.

พลอยไพริน สิทธิสาร และ วชิรพงศ์ เยาว์ฤทธิกร. (2555). การเสริมสาหร่ายผ้าในแครกเกอร์. ปริญญาตรี โครงงานพิเศษ สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

พิพัฒน์พงษ์ วงศ์ใหญ่ และ ศศิธร ชาววัลจันทึก. (2554). เภสัช มช.วิจัย “ผำ” ชี้สุดยอดแหล่งโปรตีนเพื่อสุขภาพ. สืบค้นจาก https://www.thairath.co.th/content/224328.

ภานุมาศ ทองคำ. (2562). ผลของอุณหภูมิต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในไข่ผ้าแห้งและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร. วิทยานิพนธ์คหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วนิดา ปานอุทัย. (2563). ผำ : พืชน้ำขนาดเล็กและแหล่งโปรตีนทางเลือกเพื่อสุขภาพ. Food Journal, 50(4), 28-36.

วนิดา บุรีภักดี, ธันยพร บุญศิริ, นรินทร์ภพ ช่วยการ และ ศิริวัลย์ พฤฒิวิลัย. (2566). ผลของการใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฝามาการอง. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 17(1), 1-13.

วัฒนี บุญวิทยา, นันท์ปภัทร์ ทองคำ และ ภาสุรี ฤทธิเลิศ. (2559). ผลของการเสริมไข่น้ำต่อคุณภาพของช็อกโกแลตชิฟมัฟฟิน. วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์, 11(3), 41-53.

ศันศนีย์ อุตมอ่าง. (2555). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การพัฒนาตำรับอาหารจากไข่น้ำเพื่อส่งเสริมการใช้ประโยชน์ระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์. คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

สุขุม เร้าใจ และ สุทิน สมบูรณ์. (2550). การเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.) เพื่อใช้เป็นอาหารมนุษย์.

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 11(1), 116-132.

อภิรดา พรปัณณวิชญ์ และ สุพรรณิการ์ กล่อมจอหอ. (2567). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเสริมโปรตีนจากไข่น้ำ. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. 160-169.

อธิป บุญศิริวิทย์. (2556). การพัฒนาขนมอบจากไข่ขาวประเภทมาการองทดแทนผงอัลมอนด์ด้วยผง ถั่วลิสงและผงเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต.

อุมาพร นิยะนุช และ รัชฎา ตั้งวงค์ไชย. (2553). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของไข่น้ำ. วารสาร วิทยาศาตร์เกษตร, 4(1) (พิเศษ), 247-250.

อำพรรณ ชัยกุลเสรีวัฒน์ และ ปิยมาภรณ์ เอมเสม. (2550). การผลิตโยเกิร์ตเสริมไข่น้ำ. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, 3(1), 30-36.

AOAC. (2016). Official methods of analysis of AOAC international (18th ed.). New York:

Chamber IV, E. and M.B. Wolf. (1996). *Sensory Testing Methods*. ASTM International, U.S.A.

Christophe, F. (2015). *Patisserie. Rizzoli.*

José, M. (2010). *Secrets of Macarons*. Murdoch Book.

Kemp, S.E., Hollowood, T. and Hort, J. (2009) *Sensory Evaluation: A Practical Handbook.*

Hengsawad, D., 2002, Dietary fiber for health. *Food J.*, 32. 157-159.

Herme, P. (2011). *Macarons*. Grub Street.

Hoboken, N.J. (2011). *The professional chef*. 9th ed. John Wiley & Sons.

Kakanang, P., Ratchadaporn, O., Arak, T., Jittra, S., Jirawan, O. and Anant, O. (2023). Optimum aquaculture and drying conditions for *Wolffia arrhiza* (L.) *Wimn. Heliyon*, 9. e19730.

Ruekaewma, N., Piyatiratitivorakul, S. and Powtongsook, S. (2015). Culture system for *Wolffia globosa* L. (Lemnaceae) for hygiene human food, *Songklanakarin Journal Science*, 37, 575–580.

Wu, A. (2012). Optimizing sugar ratios for macaroon taste and structure. *Food Science*, 1, (1-12).

การสกัดและการทำให้บริสุทธิ์ของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตชนิดสายโซ่กลางที่ผลิตโดย *Streptomyces* sp. โดยใช้เอนไซม์และระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค

Extraction and purification of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates produced by *Streptomyces* sp. using enzymes and an aqueous two-phase system

พรทิพพา พิญญาพงษ์[1]* และสมใจ เขียวสดใส[2]

Porntippa Pinyaphong[1*] and Somjai Khiewsodsai[2]

Received: 9 March 2025 ; **Revised**: 7 May 2025 ; **Accepted**: 6 June 2025

บทคัดย่อ

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สังเคราะห์โดยแบคทีเรียมีคุณสมบัติคล้ายพลาสติกจากปิโตรเคมี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วิธีการสกัดแบบเดิมเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องมีวิธีการสกัดที่คุ้มค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ของ PHA จากเซลล์แบคทีเรียโดยใช้เอนไซม์และระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค (ATPS) แบคทีเรียที่ใช้ศึกษาถูกแยกจากดินเพาะปลูก และเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยเกลือแร่ชนิดต่าง ๆ โดยไม่มีแหล่งคาร์บอนที่ซับซ้อน และจำกัดไนโตรเจน เอนไซม์สามชนิด (ไลโซไซม์ ปาเปน และไลเปส) ที่ความเข้มข้น 2-10 กรัม/กรัมเซลล์ ถูกใช้ในการย่อยผนังเซลล์แบคทีเรียที่แยกได้ จากนั้นศึกษาการทำให้บริสุทธิ์ของ PHA ด้วย ATPS ห้าระบบ และตรวจสอบองค์ประกอบ PHA ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปคโตรเมทรี ผลการวิจัยพบว่า แบคทีเรียที่แยกได้เป็นชนิดแกรมบวกในสกุล *Streptomyces griseoincarnatus* เอนไซม์ปาเปน (10 กรัม/กรัมเซลล์) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยผนังเซลล์ รองลงมาคือไลโซไซม์ และไลเปส ที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยให้ค่าการลดลงสัมพัทธ์การดูดกลืนแสง 81.9%, 34.2% และ 26.2% ตามลำดับ การสกัดมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้ไลโซไซม์เข้มข้น 10 กรัม/กรัมเซลล์ ย่อยผนังเซลล์ก่อน 8 ชั่วโมง และตามด้วยปาเปนเข้มข้น 10 กรัม/กรัมเซลล์ อีก 12 ชั่วโมง ให้ผลผลิต PHA สูงสุด 87.2% ระบบ PEG6000/K_2HPO_4 เป็น ATPS ที่มีประสิทธิภาพในการทำให้ PHA ที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น 58.8% และองค์ประกอบของ PHA ที่สกัดได้เป็นชนิดสายโซ่กลาง ดังนั้นการพัฒนาวิธีการสกัดโดยใช้เอนไซม์และวิธีการทำให้บริสุทธิ์โดย ATPS เป็นอีกแนวทางหนึ่งเพื่อนำไปใช้ในการกู้คืน PHA จากเซลล์แบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การสกัด, การทำให้บริสุทธิ์, พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต, เอนไซม์, ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค

Abstract

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) are biodegradable polymers synthesized by bacteria, exhibiting properties similar to petrochemical-based plastics while being environmentally friendly. Traditional extraction methods pose environmental hazards, necessitating cost-effective and eco-friendly alternatives. This study aimed to investigate the extraction and purification of PHA from bacterial cells using enzymes and an aqueous two-phase system (ATPS). The bacteria used in this study were isolated from agricultural soil and cultivated in a nitrogen-limited minimal salts medium without

[1] หลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[2] ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[1] Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, E-mail: p.pinyaphong@gmail.com

[2] Science and Technology Center, Uttaradit Rajabhat University, E-mail sujaru-kuk@hotmail.com

* Corresponding author; E-mail: p.pinyaphong@gmail.com

complex carbon sources. Three enzymes—lysozyme, papain, and lipase—at concentrations ranging from 2 to 10 g/g cell, were employed to digest the bacterial cell wall. Subsequently, the purification of PHA was examined using five different ATPSs, and the composition of the extracted PHA was analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results indicated that the isolated bacterium was identified as the Gram-positive species *Streptomyces griseoincarnatus*. Among the tested enzymes, papain at 10 g/g cell exhibited the highest efficiency in cell wall digestion, followed by lysozyme and lipase at the same concentration, with relative absorbance reductions of 81.9%, 34.2%, and 26.2%, respectively. The optimal extraction efficiency was achieved when lysozyme (10 g/g cell) was used to pre-digest the cell wall for 8 hours, followed by papain (10 g/g cell) for an additional 12 hours, yielding the highest PHA recovery of 87.2%. The PEG6000/K_2HPO_4 system was found to be the most effective ATPS, increasing the purity of the extracted PHA by 58.8%. The extracted PHA was identified as a medium-chain-length polymer. Therefore, the development of an enzymatic extraction method combined with ATPS purification provides an efficient and environmentally friendly approach for recovering PHA from bacterial cells.

Keywords: Extraction, purification, polyhydroxyalkanoates, enzyme, aqueous two-phase system

บทนำ

พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งสะสมอยู่ในเซลล์ของแบคทีเรียจำนวนมาก เพื่อใช้เป็นแหล่งสำรองคาร์บอนและพลังงานของเซลล์ในสภาวะที่ขาดสมดุลของสารอาหาร เช่น สภาวะที่มีปริมาณคาร์บอนมากเกินพอ แต่ขาดธาตุไนโตรเจน (Gumel *et al*., 2013) PHA มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับพลาสติกจากปิโตรเคมี เช่น พอลิโพรพิรีน ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปผลิตเป็นเทอร์โมพลาสติก จัดเป็นวัสดุหมุนเวียนตามธรรมชาติ และเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิตจึงมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม (Raza *et al*., 2018) ในการผลิต PHA ในระดับอุตสาหกรรมมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ต้นทุนการผลิตสูงกว่าต้นทุนในการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมีประมาณ 5-10 เท่า โดยต้นทุนหลักของการผลิต PHA มาจากสองส่วน คือ ต้นทุนวัตถุดิบ และต้นทุนกระบวนการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นกระบวนการปลายทางของการผลิต PHA ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตมากที่สุด วิธีการสกัดและทำให้บริสุทธิ์ของ PHA มี 2 วิธี คือ การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม แอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ คาร์บอเนต เป็นต้น และการสกัดโดยการทำลายเซลล์ด้วยสารเคมี เช่น สารออกซิไดซ์ กรด-ด่าง สารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นวิธีที่ได้ PHA ที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ใช้ต้นทุนสูง ใช้พลังงานมากในการกำจัดตัวทำละลายอินทรีย์เนื่องจากต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์จำนวนมากประมาณ 20 เท่าของเซลล์แบคทีเรีย และเป็นวิธีที่ให้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นสูงกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียม (Saavedra del Oso *et al*., 2020) อีกทั้งวิธีการดังกล่าวต้องใช้ควบคู่กับการปรับสภาพของเซลล์ก่อนโดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ หรือ ความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด (Pagliano *et al*., 2021) สำหรับการสกัดโดยใช้สารเคมีในการทำลายเซลล์ สามารถใช้กับเซลล์แห้งของแบคทีเรียได้โดยตรง แต่อาจส่งผลต่อลักษณะของ PHA ที่สกัดได้ เช่น มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเนื่องจากเกิดการสลายของโมเลกุลพอลิเมอร์ และมีความบริสุทธิ์ต่ำกว่า แต่มีต้นทุนต่ำกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลาย นอกจากนี้สารเหล่านี้มักจะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Mannina *et al*., 2020)

สำหรับการใช้เอนไซม์ในการทำลายเซลล์จะมีข้อดีที่เหนือกว่าการใช้สารเคมี คือ เอนไซม์มีความจำเพาะต่อเพปทิโดไกลแคนที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในแบคทีเรียชนิดแกรมบวกและแกรมลบ สภาวะที่ใช้ในการทำลายเซลล์ไม่รุนแรง และพอลิเมอร์ที่สกัดได้ไม่เสียหาย แต่มีข้อเสียคือใช้เวลานาน ราคาของเอนไซม์สูงกว่าสารเคมี Kapritchkoff *et al*. (2006) ได้ศึกษาการใช้เอนไซม์ในการสกัดและทำให้พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตโดยแบคทีเรีย *Ralstonia eutropha* DSM545 พบว่าการใช้โบรมิเลนเข้มข้น 2% ให้ผลผลิต PHB ที่มีความบริสุทธิ์ 88.8% ดังนั้นการทำลายเซลล์โดยใช้เอนไซม์ดิบ (crude enzyme) ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น เช่น เอนไซม์ปาเปน เอนไซม์ไลเปสจากยางมะละกอ และเอนไซม์ไลโซไซม์จากไข่ขาว จึงน่าสนใจในการลดต้นทุนโดยการใช้เอนไซม์แทนสารเคมี

ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค (aqueous two- phase system, ATPS) เป็นเทคนิคการแยกและทำให้สารทางชีวภาพบริสุทธิ์ โดยใช้วัฏภาคของเหลวสองชั้นที่ไม่ผสมกัน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ และสามารถขยายขนาดการผลิตได้ง่าย (Grilo *et al*., 2016) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ของ ATPS

เช่น การทำโปรตีนและเอนไซม์ให้บริสุทธิ์ การสกัดแอนติบอดี การสกัดกรดนิวคลีอิก การแยกเซลล์และออร์แกเนลล์ เป็นต้น ในการทำลายเซลล์ของแบคทีเรียโดยใช้เอนไซม์จะเพิ่มขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการสกัด PHA จากเซลล์ของแบคทีเรียโดยใช้การย่อยด้วยเอนไซม์จากยางมะละกอ และเพิ่มความบริสุทธิ์ของ PHA ที่สกัดได้โดยใช้ระบบ ATPS เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการสกัดจากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ และเพื่อเป็นกระบวนการสกัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การทดลอง

1. การเตรียมสารละลาย

สารละลาย Winogradsky Salt (WS) ใน 1 ลิตร ประกอบด้วย K_2HPO_4 0.25 กรัม $MgSO_4$ 0.125 กรัม NaCl 0.125 กรัม $Fe_2(SO_4)_3$ 2.5 มิลลิกรัม และ $MnSO_4$ 2.5 มิลลิกรัม

อาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยเกลือแร่ชนิดต่าง ๆ โดยไม่มีแหล่งคาร์บอนที่ซับซ้อน (Minimal Salt Medium, MSM) ใน 1 ลิตร ประกอบด้วย กลูโคส 10 กรัม $(NH_4)_2SO_4$ 1 กรัม $Na_2HPO_4.7H_2O$ 6.7 กรัม KH_2PO_4 0.1 กรัม $MgSO_4.7H_2O$ 0.2 กรัม $C_6H_8O_7.xFe_3^+,yNH_3$ 60 มิลลิกรัม $CaCl_2.7H_2O$ 10 มิลลิกรัม และสารละลาย Trace element 1 มิลลิลิตร

สารละลาย Trace element 1 ลิตร ประกอบด้วย $CaCl_2.7H_2O$ 1.67 กรัม $ZnSO_4.7H_2O$ 2.78 กรัม $MnCl_2.4H_2O$ 1.98 กรัม $CuCl_2.2H_2O$ 0.17 กรัม และ $FeSO_4.7H_2O$ 0.2 กรัม

สารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ประกอบด้วย $Na_2HPO_4.7H_2O$ 19.37 กรัม $NaH_2PO_4.H_2O$ 10.24 กรัม

สารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6 ประกอบด้วย $Na_2HPO_4.7H_2O$ 14.52 กรัม $NaH_2PO_4.H_2O$ 6.31 กรัม

สารละลาย Sudan Black B เข้มข้น 0.3% เตรียมโดย ชั่ง Sudan Black B 0.3 กรัม ละลายในเอทานอล 95% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. การคัดเลือกแบคทีเรียที่ผลิต PHA จากดิน

เก็บตัวอย่างดินบริเวณพื้นที่เพาะปลูกในตำบลศรีพนมมาศ อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ เก็บเศษวัสดุ ใบไม้ กิ่งไม้ออกไปก่อนเก็บตัวอย่างดิน เก็บดิน 6 จุด ที่ความลึก 15 เซนติเมตร โดยแต่ละจุดใช้พลั่วขุดหลุมเป็นรูปตัว V ในแนวดิ่ง แล้วรวมดินทั้ง 6 จุดเข้าด้วยกัน จากนั้นแบ่งดินบางส่วนลงในถุงพลาสติกประมาณ 1 กิโลกรัม เก็บรักษาตัวอย่างดินในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการวิเคราะห์ต่อไป (Thuithaisong *et al*., 2011)

การแยกจุลินทรีย์จากดิน ทำได้โดยชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม เติมสารละลาย WS 9 มิลลิลิตร ที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว นำไปเขย่าในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ปิเปตสารละลาย 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มีสารละลาย WS ที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายตัวอย่างมีความเข้มข้น 10^{-1}) ปิเปตสารละลายเชื้อที่ได้ (10^{-1}) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดที่มีสารละลาย WS ที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายเชื้อที่ความเข้มข้น 10^{-2} แล้วทำการเจือจางสารละลายเชื้อต่อไปจนถึงความเข้มข้น 10^{-10} ปิเปตสารละลายตัวอย่างในแต่ละระดับการเจือจางลงในจานเพาะเชื้อละ 1 มิลลิลิตร (2 ซ้ำ) เทอาหาร MSM agar อุณหภูมิประมาณ 45 $\pm$ 1 องศาเซลเซียส ประมาณ 12-15 มิลลิลิตร ในจานเพาะเชื้อ หมุนจานเพาะเชื้อเพื่อให้อาหารและสารละลายเชื้อเข้ากัน ทิ้งไว้จนกระทั่งอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้วนำไปทดสอบการย้อมสีแกรม และความสามารถในการผลิต PHA โดยการย้อมสีด้วย Sudan Black B

3. การย้อมสีแกรม

การย้อมสีแกรมของจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่แยกได้จากดินว่ามีลักษณะเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวกหรือแกรมลบมีขั้นตอนดังนี้ ใช้ห่วงเขี่ยเชื้อมาลนไฟจนกระทั่งร้อนจัดแล้วแตะน้ำมาใส่บนแผ่นสไลด์เล็กน้อย จากนั้นใช้ห่วงเขี่ยเชื้อแตะเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้ในข้อ 2 แล้วนำมาเกลี่ยลงบนแผ่นสไลด์ให้บางที่สุด ตรึงโดยผ่านความร้อน และรอให้สไลด์แห้งสนิท หยด Crystal Violet ลงให้ท่วมรอยจุลินทรีย์ วางสไลด์ทิ้งไว้ 30 วินาที ล้างสีออกด้วยน้ำกลั่น จนสีของ Crystal Violet ถูกชะออกจนหมด จากนั้นหยดสารละลายไอโอดีนให้ท่วมรอยจุลินทรีย์ตั้งทิ้งไว้อีก 30 วินาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่น และล้างสีออกด้วยเอทานอล 95% หยด Safranin O ตั้งทิ้งไว้ 30 วินาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่นจนสีส่วนเกินนอกเหนือบริเวณที่ละเลงไว้ถูกชะจนหมด จากนั้นวางสไลด์ไว้ให้แห้งสนิทแล้วนำไปส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optika, B-383PLi, Italy) ที่กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 100X ถ้าเป็นแบคทีเรียแกรมลบจะติดสีแดงของ Safranin O ถ้าเป็นแบคทีเรียแกรมบวกจะติดสีม่วงของ Crystal violet

4. การทดสอบการสังเคราะห์ PHA

การทดสอบจุลินทรีย์ที่สามารถผลิต PHA โดยการย้อมสีด้วย Sudan Black B มีรายละเอียดดังนี้ นำห่วงเขี่ยเชื้อมาลนไฟให้ปลายห่วงมีสีแดง ใช้ห่วงเขี่ยเชื้อแตะเชื้อที่แยกได้ในข้อ 2 แล้วนำมาเกลี่ยตรงกลางสไลด์ รอให้แห้งในอากาศ ตรึงโดยผ่านความร้อน หยดสารละลาย Sudan Black B 1-2 หยด วางสไลด์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10 นาที ล้างสไลด์ด้วยน้ำกลั่น ทำสไลด์ให้แห้ง แล้วหยด Safranin O เข้มข้น 0.5% วางสไลด์ทิ้งไว้ 5 วินาที ล้างสไลด์ด้วยน้ำกลั่น และปล่อยให้แห้ง นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์โดยใช้กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ 100x หากจุลินทรีย์มีการผลิต PHA ภายในเซลล์ จะย้อมติดสีน้ำเงินของ Sudan Black B ดัดแปลงจาก Burdon (1946)

5. การจัดจำแนกสายพันธุ์แบคทีเรียที่แยกได้จากดิน

นำแบคทีเรียไอโซเลตที่สามารถผลิตและสะสม PHA ได้ มาจัดจำแนกสายพันธุ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA โดยส่งวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

6. การเตรียมเซลล์แบคทีเรีย

นำแบคทีเรียที่แยกได้ในข้อ 2 มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MSM โดยปรับพีเอชของอาหารให้เท่ากับ 7 บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ได้ปริมาณเซลล์ 30 กรัม ที่สะสม PHA คิดเป็น 68.9% โดยน้ำหนักเซลล์แห้ง (พรทิพพา พิญญาพงษ์, 2564) นำสารละลายซัสเพนชันของเซลล์ทั้งหมด 2000 มิลลิลิตร มาแบ่งปั่นแยกเซลล์ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จำนวน 10 ครั้ง ด้วยความเร็ว 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำตะกอนเซลล์ที่ได้มารวมกัน แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว 2 ครั้ง จากนั้นอบเซลล์ให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (Bhuwal *et al*., 2013) เพื่อนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

7. การย่อยเซลล์แบคทีเรียโดยเอนไซม์

เตรียมสารละลายเซลล์ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร เพื่อใช้ในการศึกษาความสามารถในการย่อยเซลลแบคทีเรียโดยเอนไซม์ 3 ชนิด ได้แก่ ปาเปนจากผงมะละกอ ไลเปสจากยางมะละกอ และไลโซไซม์จากไข่ขาว ดังนี้ ตวงสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพูใบที่ 1 (ทดสอบการย่อยเซลล์ของเอนไซม์ไลโซไซม์จากไข่ขาว) และใบที่ 2 (ทดสอบการย่อยเซลล์ของเอนไซม์ไลเปสจากยางมะละกอ) ตวงสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพูใบที่ 3 (ทดสอบการย่อยเซลล์ของเอนไซม์ปาเปนจากผงมะละกอ) จากนั้นเติมสารละลายเซลล์ (ความเข้มข้น 20 กรัม/ลิตร) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ทั้ง 3 ใบ แล้วเติมเอนไซม์ไลโซไซม์จากไข่ขาว เอนไซม์ไลเปสจากยางมะละกอ และเอนไซม์ปาเปนจากผงมะละกอ อย่างละ 2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ความเข้มข้นของเอนไซม์ต่อมวลแบคทีเรียเท่ากับ 2%) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 และ 3 ไปบ่มในเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สำหรับสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 2 นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที (Kapritchkoff *et al*., 2006) สำหรับการทดลองควบคุมดำเนินการแบบคู่ขนานโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์แทนเอนไซม์ เก็บสารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ในช่วงเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:50) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตรโดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณเป็นค่าการลดลงสัมพัทธ์ของการดูดกลืนแสง (Relative absorbance reduction; AR) ดังสมการ

$$AR = [(Abs_{min} - Abs_0) \times 100]/Abs_0$$

เมื่อ Abs_{min} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายปฏิกิริยา

Abs_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของการทดลองควบคุม

ทำการทดลองซ้ำดังกล่าวข้างต้น โดยเปลี่ยนปริมาณเอนไซม์แต่ละชนิด เป็น 4, 6, 8 และ 10 กรัม ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาการใช้เอนไซม์สองชนิด (ไลโซไซม์และปาเปน) ในการสกัด PHA ออกจากเซลล์แบคทีเรียแบบเรียงลำดับ เริ่มต้นโดยตวงสารละลายเซลล์เข้มข้น 20 กรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ทั้งสามใบ เติมเอนไซม์ไลโซไซม์ 10 กรัม แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที โดยขวดรูปชมพู่ใบที่ 1, 2 และ 3 บ่มเป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายในขวดรูปชมพู่แต่ละใบไปปั่นแยกเซลล์ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำตะกอนเซลล์มาล้างด้วยน้ำกลั่นที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว 1 ครั้ง แล้วตามด้วยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6 อีกครั้งจากนั้นนำไปปั่นแยกด้วยเครื่อง

ปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำเซลล์ที่ได้มาเติมสารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเอนไซม์ปาเปน 10 กรัม ลงไปในสารละลายขวดรูปชมพู่ทั้งสามใบ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เก็บสารละลายตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในช่วงเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ นำไปวิเคราะห์ปริมาณ PHA ต่อไป

8. การคัดเลือกระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคในการทำ PHA ให้บริสุทธิ์

ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคได้มาจากการผสมสารละลายพอลิเมอร์สองชนิดที่ต่างกัน เช่น พอลิเอทิลีน-ไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) กับเด็กซ์แทรน (Dextran) พอลิเอทิลีนไกลคอลกับมอลโตเดกซ์ทริน (maltodextrin) เป็นต้น หรือ การผสมพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวกับสารประกอบเกลืออนินทรีย์ เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอลกับ K_2HPO_4 (Grilo *et al*., 2016) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เตรียมระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค 5 ระบบในหลอดทดลอง ได้แก่ PEG8000/K_2HPO_4, PEG6000/K_2HPO_4, PEG4000/K_2HPO_4, PEG4000/Maltodextrin และ PEG4000/Dextran40000 แต่ละระบบมีน้ำหนักรวม 40 กรัม โดยส่วนประกอบที่สร้างวัฏภาค คือ 14.6:9.0, 18.0:7.5, 11.0:12.0, 10.5:9.2 และ 5.4:8.0 (%โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ ซึ่งได้จากการศึกษาแผนภาพวัฏภาคของการเกิดระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคเบื้องต้น (พรทิพพา พิญญาพงษ์, 2567) จากนั้นเติมสารละลายผสมของเอนไซม์กับเซลล์จากการทดลองในข้อ 7 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคแต่ละระบบ เขย่าสารละลายให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเกิดการแยกวัฏภาคอย่างสมบูรณ์ ทำการวิเคราะห์ปริมาณของ PHA ในแต่ละวัฏภาค

9. การวิเคราะห์ปริมาณ PHA

นำสารละลายในแต่ละวัฏภาคมาเติมคลอโรฟอร์ม ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อสกัด PHA ให้มาอยู่ในชั้นของคลอโรฟอร์ม นำสารละลายในชั้นของคลอโรฟอร์มไปต้มในอ่างน้ำเดือดเพื่อระเหยคลอโรฟอร์มออกไป จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไป แล้วนำไปต้มต่อในอ่างน้ำเดือดอีก 10 นาที เพื่อเปลี่ยน PHA ให้เป็นกรดโครโทนิค (crotonic acid) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 235 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดโครโทนิค เพื่อคำนวณหาปริมาณของ PHA ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

10. การวิเคราะห์องค์ประกอบของ PHA

ชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง 20 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลองที่มีฝาปิด เติมคลอโรฟอร์ม 2 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟูริกในเมทานอลความเข้มข้น 3% 2 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยสารละลายทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันนาน 5 นาที ตั้งหลอดทดลองไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารละลายแยกเป็น 2 ชั้น เก็บสารละลายในชั้นคลอโรฟอร์มเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ โดยใช้แคปพิลลารีคอลัมน์ ชนิด DB-5 (30 เมตร x 0.25 มิลลิเมตร) ความหนา 0.25 ไมโครเมตร อุณหภูมิ injector เท่ากับ 230 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ เริ่มต้นที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที จนกระทั่งถึง 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ detector เท่ากับ 250 องศาเซลเซียส split ratio เท่ากับ 1:50 ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพาด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรตัวอย่างที่ฉีด 1 ไมโครลิตร

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การคัดเลือกแบคทีเรียจากดินและจำแนกชนิดของแบคทีเรียที่ผลิต PHA

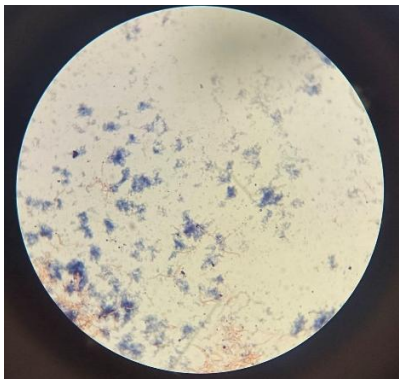
จากการนำตัวอย่างดินเพาะปลูก มาทำการเจือจางแบบต่อเนื่อง (serial dilution) และเพาะเชื้อในอาหารสูตร MSM agar ตรวจพบจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 5.5 x 10^6 CFU/g เมื่อพิจารณาการเจริญของโคโลนีพบว่ามีความแตกต่างกันอยู่ 2 ลักษณะ คือ โคโลนีที่เจริญอยู่บนอาหารแข็ง และโคโลนีเจริญอยู่ใต้อาหารแข็ง โดยกำหนดเป็นไอโซเลต 1 และไอโซเลต 2 ตามลำดับ ผลการตรวจสอบการย้อมสีแกรม และความสามารถในการผลิต PHA เบื้องต้นด้วย Sudan Black B ของทั้งสองไอโซเลต แสดงใน Table 1 และ Figure 1 สำหรับผลการจำแนกสายพันธุ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA แสดงใน Table 2

Table 1 Characteristics of isolated bacteria observed under the microscope.

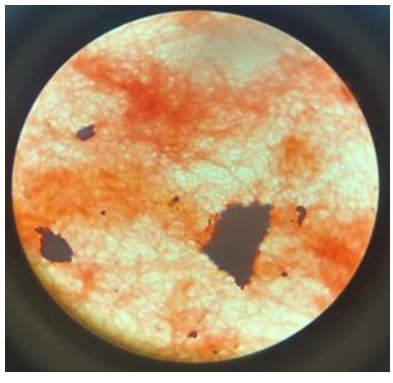
Isolate	Colony characteristics	Gram staining	Staining with Sudan Black B
1	Round-shaped and clustered together, resembling a grape-like arrangement	Gram positive	Dark blue
2	Filamentous and clustered together	Gram positive	Reddish-orange

Table 2 Analysis of the gene nucleotide sequence of 16S rRNA.

Isolate	Similar to	%Identity
1	*Streptomyces griseoincarnatus*	99.40
	Streptomyces griseoflavus	99.00
	Streptomyces althioticus	98.70
2	*Streptomyces kebangsaanensis*	99.10
	Streptomyces cyslabdanicus	98.60
	Streptomyces corchorusii	98.40



(a)



(b)

Figure 1 The characteristics of bacteria stained with Sudan Black B under a microscope are observed when (a) it is isolated bacterium 1 and (b) it is isolated bacterium 2.

ผลการตรวจสอบแบคทีเรียที่แยกได้ทั้งสองไอโซเลตเบื้องต้นโดยการย้อมสีด้วย Sudan Black B แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียไอโซเลต 1 สามารถผลิต PHA ได้ เนื่องจากเซลล์แบคทีเรียยังคงมีสีน้ำเงินเข้มหลังกระบวนการล้างสี ซึ่งถูกจัดว่าเป็นสายพันธุ์ที่สามารถผลิต PHA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Adebajo *et al*., 2024) จากการศึกษา 16S rRNA ของแบคทีเรียไอโซเลต 1 ที่แยกได้ จัดอยู่ในกลุ่ม *Streptomyces* ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ *Streptomyces griseoincarnatus* มากที่สุด สอดคล้องกับรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการแยกแบคทีเรียสายพันธุ์ *Streptomyces* จากตัวอย่างดิน เป็นแบคทีเรียแกรมบวก สามารถผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารต้านจุลชีพ และสารออกฤทธิ์ทางเภสัชกรรมได้ (Zhang *et al*., 2023) แต่ยังไม่มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการผลิต PHA ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำแบคทีเรีย *S. griseoincarnatus* มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MSM เพื่อทำการศึกษาการสกัด PHA ออกจากเซลล์ของแบคทีเรียโดยวิธีการใช้เอนไซม์และทำให้บริสุทธิ์โดยระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค

การกู้คืนพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจากเซลล์ของแบคทีเรียโดยวิธีการสกัดโดยใช้เอนไซม์

ผลการศึกษาการใช้เอนไซม์สามชนิด ได้แก่ ปาเปน ไลโซไซม์ และไลเปส ในการทำลายเซลล์ *S. griseoincamatus* แสดงใน Figure 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์แต่ละชนิดจะทำให้เซลล์ถูกทำลายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งพิจารณาได้จากค่าการลดค่าการดูดกลืนแสงสัมพัทธ์ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของเอนไซม์แต่ละชนิดเท่ากับ 10 กรัม/กรัมเซลล์ พบว่าเอนไซม์ปาเปนสามารถทำลายเซลล์แบคทีเรียได้สูงที่สุด (ค่า AR เท่ากับ 81.9%) ในขณะที่เอนไซม์ไลโซไซม์ และเอนไซม์ไลเปสทำลายเซลล์แบคทีเรียได้น้อยกว่า (ค่า AR < 56%) ซึ่งอาจเป็นเพราะในโครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรียประกอบด้วยเพปติโดไกลแคนและโปรตีนอื่น ๆ ภายในเซลล์ ซึ่งคิดเป็น 55% ของมวลชีวภาพทั้งหมดจึงทำให้เอนไซม์ปาเปนซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเอนไซม์โปรติเอสสามารถทำการย่อยเซลล์ได้ดีกว่าเอนไซม์อีกสองชนิด (Kapritchkoff *et al*., 2006) แม้ว่าไลโซไซม์จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าปาเปนในการทำลายเซลล์แต่ไลโซโซมสามารถย่อยพันธะบีต้า 1,4-ไกลโคซิดิกระหว่างเอ็นอะซีทิลกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine, GlcNAc) และเอ็นอะซีทิลมูรามิคแอซิด (N-acetylmuramic acid, MurNAc) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเพปติโดไกลแคนที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของแบคทีเรียโดยเฉพาะชนิดที่ย้อมติดสีแกรมบวก (Vanderkelen *et al*., 2011) ส่วนเอนไซม์ไลเปสจากยางมะละกอจะมีความสามารถในการย่อยเซลล์ได้น้อยที่สุด ซึ่งอาจเนื่องจากเอนไซม์ไลเปสจากยางมะละกอมีความสามารถในการไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์ทำให้ได้กรดไขมันและกลีเซอรอล จึงไม่สามารถย่อยฟอสฟาติดิลกลีเซอรอล กรดริบิทอลไทโคอิกและกรดไลโปเตอิโคอิกที่เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของแบคทีเรียสกุล *Streptomyces* ได้ (Mistou *et al*., 2016)

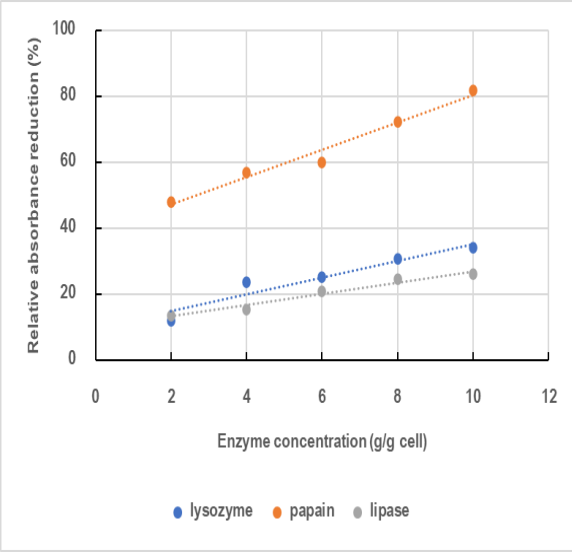


Figure 2 The ability of each enzyme to reduce absorbance after 12 hours of incubation.

ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยเซลล์แบคทีเรีย *S. griseoincamatus* โดยใช้เอนไซม์ จึงทำการศึกษาการใช้เอนไซม์สองชนิดในการย่อยเซลล์แบคทีเรียแบบเรียงลำดับ คือ เริ่มต้นย่อยเซลล์โดยใช้เอนไซม์ไลโซไซม์ก่อนแล้วตามด้วยเอนไซม์ปาเปน ผลการศึกษาพบว่า การสกัดโดยใช้ไลโซไซม์เข้มข้น 10 กรัม/กรัมเซลล์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการสกัดโดยใช้ปาเปนเข้มข้น 10 กรัม/กรัมเซลล์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่พีเอช 6 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ปริมาณ PHA 84.5% (Table 3) เมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดโดยเอนไซม์ไลโซไซม์เป็น 8 ชั่วโมง แล้วตามด้วยปาเปน 12 ชั่วโมง จะได้ปริมาณของ PHA เพิ่มขึ้นเป็น 87.2% ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Yasotha *et al*. (2006) ทำการสกัด PHA สายโซ่กลางจากเซลล์ *Pseudomonas putida* ด้วยเอนไซม์อัลคาเลสกับ SDS ที่พีเอช 8.5 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยเอนไซม์ไลโซไซม์กับ EDTA ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณ PHA เกือบ 90% แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการสกัดด้วยไลโซไซม์เพิ่มขึ้นเป็น 12 ชั่วโมง แล้วตามด้วยปาเปนอีก 12 ชั่วโมง จะทำให้ปริมาณ PHA ลดลงเหลือ 82.2% (Table 3) ซึ่งเป็นไปได้ว่าการใช้เวลาในการบ่มเซลล์กับไลโซไซม์ที่ 12 ชั่วโมงจะส่งผลให้เกิดการสลายผนังเซลล์มากเกินไปจึงทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น (Eggink & Northolt, 1999)

Table 3 The sequential enzymatic extraction of PHA begins with lysozyme, followed by papain.

Lysozyme (g/g cell)	Extraction time (h)	Papain (g/g cell)	Extraction time (h)	Extracted PHA (%)
10	4	10	4	82.5
			8	83.6
			12	84.5
10	8	10	4	85.7
			8	86.4
			12	87.2
10	12	10	4	80.5
			8	81.3
			12	82.2

การทำพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่ได้จากการสกัดให้บริสุทธิ์

ผลการศึกษาระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคชนิดต่าง ๆ 5 ระบบ ได้แก่ (1) PEG8000/K_2HPO_4 (2) PEG6000/K_2HPO_4 (3) PEG4000/K_2HPO_4 (4) PEG 4000/Maltodextrin และ (5) PEG4000/Dextran 40,000 ในการแยก PHA ออกจากสารละลายผสมของเซลล์และเอนไซม์ แสดงใน Table 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของ PHA (partition coefficient, K_{pa}) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนของผลผลิตที่ได้ในวัฏภาคบนสุดต่อวัฏภาคล่างสุด ของระบบ PEG6000/K_2HPO_4 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือระบบ PEG4000/K_2HPO_4, PEG4000/Maltodextrin, PEG 4000/Dextran และ PEG8000/K_2HPO_4 ตามลำดับ ผลผลิต (yield) ของ PHA ที่แยกได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน ขณะที่ความบริสุทธิ์ของ PHA ที่แยกได้จากระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค PEG8000/K_2HPO_4 จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 59.9% ส่วนระบบอื่น ๆ มีค่าความบริสุทธิ์ของ PHA อยู่ในช่วง 43.8 – 47.0% ถึงแม้ว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีแนวโน้มที่จะสร้างระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคที่เสถียร และเพิ่มระดับการแบ่งวัฏภาคได้มากกว่า PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Nontawong *et al*., 2023) อย่างไรก็ตามการแยกชั้นของ PHA ในระบบอาจมีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ PHA และสภาพแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ 6000 เนื่องจากทำให้ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของ PHA และผลผลิตของ PHA ที่ได้สูงสุด (29%) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำให้ PHA ที่สกัดได้จาก *P. putida* บริสุทธิ์โดยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) ซึ่งทำให้ PHA บริสุทธิ์ขึ้นถึง 92.6% (Yasotha *et al*., 2006) อย่างไรก็ตามการใช้ระบบ

สารละลายน้ำสองวัฏภาคเป็นระบบที่เตรียมได้ง่าย ราคาถูก สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

Table 4 Purification of PHA using different types of aqueous two-phase systems.

Aqueous two-phase system	Partition coefficient (K_{pa})	Yield (%)	Purity (%)
PEG8000/K_2HPO_4	0.681	13.7	59.9
PEG6000/K_2HPO_4	1.630	29.0	47.0
PEG4000/K_2HPO_4	1.332	26.9	47.2
PEG4000/Maltodextrin	0.804	17.2	43.8
PEG4000/Dextran	0.796	17.3	47.1

องค์ประกอบของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตที่ผลิตได้โดยเชื้อ *Streptomyces griseoincarnatus*

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของ PHA ที่ผลิตโดยเซลล์ *S. griseoincarnatus* ด้วย GC-MS ผลการวิเคราะห์แสดงใน Table 5 จะเห็นได้ว่า สาร PHA ที่สกัดได้จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดสายโซ่กลางที่ประกอบด้วย 3-ไฮดรอกซี-14-เมทิลเพนตะเดคาโนเอต (3-hydroxy-14-methylpentadecanoate) มากที่สุด รองลงมาคือ 3-ไฮดรอกซีเฮกซะเดคาโนเอต (3-hydroxyhexadeca- noate, C16) 3-ไฮดรอกซีเตตระเดคาโนเอต (3-hydroxy-tetradecanoate, C14) 3-ไฮดรอกซีเตตระเดซีโนเอต (3-hydroxytetradecenoate, C14:1) 3-ไฮดรอกซี-เฮกซะเดคาไดอีโนเอต (3-hydroxy-hexade cadienoate, C16:2) 3-ไฮดรอกซีเฮกซะเดซีโนเอต(3-hydroxyhex adeceno-ate, C16:1) และ 3-ไฮดรอกซี-12-เมทิลไตรเดคาโนเอต (3-hydroxy-12-methyltrideca- noate, C15) ตามลำดับ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Valappil *et al*. (2007) พบว่าองค์ประกอบของ PHA ส่วนใหญ่ที่พบใน *Streptomyces* sp. (ATCC1238) เป็นชนิดสายโซ่สั้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการใช้แหล่งของคาร์บอนและแร่ธาตุในอาหารเลี้ยงเชื้อแตกต่างกัน (Wampfler *et al*., 2010)

Table 5 The composition of polyhydroxyalkanoates in the form of methyl esters produced by *S. griseoincarnatus*.

Peak No	Retention time (min)	Compound identified	Composition (%)
1	19.010	3-hydroxy-12-methyltride-canoate	2.19
2	21.162	3-hydroxytetradecenoate	7.15
3	21.325	3-hydroxytetradecanoate	16.27
4	23.235	3-hydroxy-14-methylpen-tadecanoate	34.42
5	23.961	3-hydroxyhexadecenoate	6.39
6	25.194	3-hydroxyhexadeca dien-oate	6.76
7	25.353	3-hydroxyhexadecanoate	19.12

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นการใช้เอนไซม์ปาเปนร่วมกับไลโซไซม์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรียสกุล *S. griseoincarnatus* ทำให้ได้ปริมาณของ PHA สูงสุด โดยไลโซไซม์จะช่วยย่อยเพปติโดไกลแคนทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย ซึ่งส่งผลให้ปาเปนสามารถเข้าไปย่อยโปรตีนภายในเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาคสามารถนำมาใช้ในการทำ PHA ให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นได้ โดยการใช้ระบบ PEG/K_2HPO_4 ทำให้ PHA ที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น และ PHA ที่ได้จากแบคทีเรีย *S. griseoincarnatus* เป็นชนิดสายโซ่กลาง ดังนั้นควรมีการศึกษาคุณลักษณะของ PHA ที่สกัดได้ต่อไป เพื่อจะได้นำ PHA ไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป รวมถึงการทดลองสกัดและทำให้ PHA ให้บริสุทธิ์ในระดับการผลิตที่มากขึ้นเพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน ปีงบประมาณ 2567 จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (รหัสโครงการ 193502)

เอกสารอ้างอิง

พรทิพพา พิญญาพงษ์. (2564). การผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจากน้ำมันใช้แล้วโดยแบคทีเรียที่แยกได้จากดิน. *PSRU Journal of Science and Technology*, *6*(2), 69–85.

พรทิพพา พิญญาพงษ์. (2567). *การกู้คืนและการทำให้บริสุทธิ์ของพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตจากชีวมวลของแบคทีเรียโดยการใช้การย่อยด้วยเอนไซม์และระบบน้ำสองวัฏภาค*. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.

Adebajo, S. O., Bankole, P. O., Ojo, A. E., & Akintokun, P. O. (2024). Screening and optimization of polyhydroxybutyrate (PHB) by *Lysinibacillus fusiformis* from diverse environmental sources. *The Microbe*, *2*, Article 100043. https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100043

Bhuwal, A. K., Singh, G., Aggarwal, N. K., Goyal, V., & Yadav, A. (2013). Isolation and screening of polyhydroxyalkanoates producing bacteria from pulp, paper, and cardboard industry wastes. *International Journal of Biomaterials*, *2013*, Article 752821. https://doi.org/10.1155/2013/752821

Burdon, K. L. (1946). Fatty material in bacteria and fungi revealed by staining dried, fixed slide preparations. *Journal of Bacteriology*, *52*(6), 665–678.

Eggink, G., & Northolt, M. D. (1999). *Method for producing a biological degradable polyhydroxyalkanoate coating with the aid of an aqueous dispersion of polyhydroxyalkanoate* (U.S. Patent No. 5,958,480). U.S. Patent and Trademark Office.

Grilo, A. L., Aires-Barros, M. R., & Azevedo, A. M. (2016). Partitioning in aqueous two-phase systems: Fundamentals, applications and trends. *Separation and Purification Reviews*, *45*(1), 68–80.

Gumel, A. M., Annuar, M. S. M., & Chisti, Y. (2013). Recent advances in the production, recovery and applications of polyhydroxyalkanoates. *Journal of Polymers and the Environment*, *21*, 580–605.

Kapritchkoff, F. M., Viotti, A. P., Alli, R. C. P., Zuccolo, M., Pradella, J. G. C., Maiorano, A. E., Miranda, E. A., & Bonomi, A. (2006). Enzymatic recovery and purification of polyhydroxybutyrate produced by *Ralstonia eutropha*. *Journal of Biotechnology*, *122*(4), 453–462.

Mannina, G., Presti, D., Montiel-Jarillo, G., Carrera, J., & Suarez-Ojeda, M. E. (2020). Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review. *Bioresource Technology*, *297*, Article 122478. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122478

Mistou, M. Y., Sutcliffe, I. C., & van Sorge, N. M. (2016). Bacterial glycobiology: Rhamnose-containing cell wall polysaccharides in Gram-positive bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, *40*(4), 464–479.

Nontawong, B., Bunchoen, P., & Ratanapongleka, K. (2023). Factors affecting the partitioning of peroxidase from aqueous two-phase extraction. *Engineering and Technology Horizons*, *40*(3), Article 400306. https://doi.org/10.55003/ETH.400306

Pagliano, G., Galletti, P., Samorì, C., Zaghini, A., & Torri, C. (2021). Recovery of polyhydroxyalkanoates from single and mixed microbial cultures: A review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *9*, Article 624021. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.624021

Raza, Z. A., Abid, S., & Banat, I. M. (2018). Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *126*, 45–56.

Saavedra del Oso, M., Mauricio-Iglesias, M., & Hospido, A. (2020). Evaluation and optimization of the environmental performance of PHA downstream processing. *Chemical Engineering Journal*, *412*, Article 127687. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127687

Thuithaisong, C., Parkpian, P., Shipin, O. V., Shrestha, R. P., Naklang, K., Delaune, R. D., & Jugsujinda, A. (2011). Soil-quality indicators for predicting sustainable organic rice production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *42*(5), 548–568.

Valappil, S. P., Boccaccini, A. R., Bucke, C., & Roy, I. (2007). Polyhydroxyalkanoates in Gram-positive bacteria: Insights from the genera *Bacillus* and *Streptomyces*. *Antonie van Leeuwenhoek*, *91*, 1–17.

Vanderkelen, L., Van Herreweghe, J. M., Vanoirbeek, K. G. A., Baggerman, G., Myrnes, B., Declerck, P. J., Nilsen, I. W., Michiels, C. W., & Callewaert, L. (2011). Identification of a bacterial inhibitor against g-type lysozyme. *Cellular and Molecular Life Sciences*, *68*, 1053–1064.

Wampfler, B., Ramsauer, T., Rezzonico, S., Hischier, R., Köhling, R., Thöny-Meyer, L., & Zinn, M. (2010). Isolation and purification of medium chain length poly(3-hydroxyalkanoates) (mcl-PHA) for medical applications using nonchlorinated solvents. *Biomacromolecules*, *11*(10), 2716–2723.

Yasotha, K., Aroua, M. K., Ramachandran, K. B., & Tan, I. K. P. (2006). Recovery of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates (PHAs) through enzymatic digestion treatments and ultrafiltration. *Biochemical Engineering Journal*, *30*(3), 260–268.

Zhang, Z., Sun, Y., Yi, Y., Bai, X., Zhu, L., Zhu, J., Gu, M., Zhu, Y., & Jiang, L. (2023). Screening and identification of a *Streptomyces* strain with quorum-sensing inhibitory activity and effect of the crude extracts on virulence factors of *Pseudomonas aeruginosa*. *Microorganisms*, *11*(8), Article 2079. https://doi.org/10.3390/microorganisms11082079

ความชุกและความแปรผันทางพันธุกรรมของเชื้อไวรัสพาร์โวในแมวที่พบในภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย

Prevalence and genetic variation of Feline Parvovirus (FPV) infection in the central and eastern regions of Thailand

สมชาย โสมย์ไพศาลศิลป์[1], ศิริลักษณ์ มีสุวรรณ[1], ทิพวัลย์ จันทะฟอง และปัทมา มุฑฒิ[1]*

Somchai Sompaisarnsilp[1], Sirilak Mesuwan[1], Tippawan Jantafong[2] and Pattama Mutthi[1]*

Received: 21 April 2025 ; **Revised**: 19 June 2025 ; **Accepted**: 14 July 2025

บทคัดย่อ

เชื้อไวรัสพาร์โวในแมว หรือ Feline Parvovirus (FPV) เป็นเชื้อไวรัสที่ทำให้เกิดอาการท้องเสียรุนแรงและทำให้เกิดโรคลำไส้อักเสบในแมว ซึ่งมีอัตราการเสียชีวิตค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในแมวเด็กที่ไม่ได้ทำวัคซีน อีกทั้งยังมีรายงานพบว่าแมวมีความไวต่อการติดเชื้อได้ทั้ง FPV และ Canine Parvovirus type2 (CPV-2) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการหาความชุกของโรคลำไส้อักเสบในแมวจากเชื้อไวรัสพาร์โวหรือโรคไข้หัดแมวที่พบในภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน 2565 ไปจนถึง เดือนเมษายน 2567 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 1 ปี 6 เดือน และวิเคราะห์ความแปรผันทางพันธุกรรมของเชื้อไวรัสไวรัสพาร์โวในแมวร่วมด้วย ผลที่ได้พบความชุกของโรคลำไส้อักเสบในแมวจากเชื้อไวรัสพาร์โวหรือโรคไขหัดแมวเท่ากับร้อยละ 14.29 และมีอัตราความชุกของโรคสูงในเดือน พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และ กุมภาพันธ์ โดยอยู่ในช่วงของฤดูหนาวของทุกปี ส่วนฤดูฝนพบการเกิดโรคได้บ้าง และฤดูร้อนพบอัตราการเกิดโรคต่ำที่สุด ซึ่งยังคงสอดคล้องกับการติดเชื้อตามธรรมชาติของไวรัสและการแพร่กระจายของโรคในอดีตที่ผ่านมา การหาความสัมพันธ์ความชุกของการเกิดโรคลำไส้อักเสบในแมวจากเชื้อไวรัสพาร์โวในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย ด้วยวิธี Sperman rank correlation บ่งชี้ว่า อาการป่วยในระบบทางเดินอาหารของแมวและการติดเชื้อลำไส้อักเสบในแมวจากไวรัสพาร์โว หรือ โรคไข้หัดแมว มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก โดยค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ = 0.84 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบวิธีการตรวจวินิจฉัยโรคลำไส้อักเสบในแมวจากเชื้อไวรัสพาร์โวหรือโรคไข้หัดแมวระหว่างชุดทดสอบไวรัสพาร์โวแบบรวดเร็วทางการค้า (Immunochromatography; IC Test) และการตรวจสอบยีน *VP2*-FPV โดยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (PCR) พบค่าความไวของการตรวจคัดกรอง (Sensitivity) เท่ากับ ร้อยละ 62.96 (17/27) และ ค่าพยากรณ์ความถูกต้องของผลบวก (Positive predictive value; PPV คือ สัดส่วนผลการตรวจที่ได้ผลเป็นโรคจริงจากจำนวนทั้งหมดที่ผลตรวจบ่งชี้ว่าเป็นโรค) เท่ากับ ร้อยละ 65.38 (17/26) ดังนั้นการใช้ชุดทดสอบแบบรวดเร็วทางการค้าจะให้ผลบวกอยู่ที่ร้อยละ 62.96% และความถูกต้องของผลบวกของโรคนั้นอยู่ร้อยละ 65.38% เมื่อเทียบกับวิธีการตรวจแบบมาตรฐาน (Gold Standard) หรือ PCR ผลการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน *VP2* ทั้ง FPV (236 bp) และ CPV-2 (529 bp) พบว่าแมวที่ติดเชื้อไวรัสพาร์โวหรือไข้หัดแมวทั้งหมดมีสารพันธุกรรมเฉพาะ FPV เท่านั้น แสดงให้เห็นว่ายังไม่มีความผันแปรของพันธุกรรมของไวรัสในการติดเชื้อข้ามสายพันธุ์ในประชากรแมวที่อาศัยในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย ในขณะนี้

คำสำคัญ: เชื้อพาร์โวไวรัสในแมว, โรคไข้หัดแมว, เชื้อพาร์โวไวรัสในสุนัข, ยีน *VP2*, ความแปรผันทางพันธุกรรม

[1] คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ ชลบุรี

[2] คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ลาดกระบัง

[1] Faculty of Veterinary Medicine, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bang Phra Campus, Chon Buri

[2] Department of Veterinary Microbiology, Faculty of Veterinary Medicine, Mahanakorn University of Technology

* Corresponding author: Pattama Mutthi; Email: pattama_mu@rmutto.ac.th

Abstract

Feline Parvovirus (FPV) causes severe bloody diarrhea and feline enteritis, with a relatively high mortality rate, especially in unvaccinated kittens. Additionally, previous studies have indicated that cats are susceptible to infection by both FPV and Canine Parvovirus Type 2 (CPV-2). This study aimed to determine the prevalence of FPV, also known as feline distemper or feline panleukopenia, in the central and eastern regions of Thailand. Cat sample collection was conducted from November 2022 to April 2024, spanning a total period of 1.5 years, to investigate the prevalence of the disease and analyze the genetic variation of FPV. The findings revealed that the prevalence of FPV infection was 14.29%. The highest prevalence was observed in November, December, January, and February, which correspond to the winter season. In contrast, some cases were detected during the rainy season, while the lowest prevalence was recorded during the summer. These findings align with the natural infection patterns and past transmission trends of the virus. The correlation analysis using Spearman's rank correlation method indicated a strong relationship between gastrointestinal illness in cats and feline enteritis caused by FPV. The correlation coefficient was 0.84 at a significance level of $p \leq 0.05$. In addition, a comparative evaluation of diagnostic methods for FPV was conducted between a commercial rapid immunochromatographic test (IC Test) and polymerase chain reaction (PCR) detection of the VP2 gene of FPV/CPV-2. The sensitivity of the rapid IC test was 62.96% (17/27), while the positive predictive value (PPV), which is the proportion of true positive cases among all positive test results, was 65.38% (17/26). This indicated that the commercial rapid IC test detected 62.96% of positive cases, with a 65.38% accuracy rate compared to the gold standard PCR method. Moreover, the nucleotide sequence analysis of the VP2 gene in both FPV (236 bp) and CPV-2 (529 bp) revealed that all cases contained only FPV-specific genetic material. This suggested that at present, no genetic variation leading to cross-species transmission has occurred among the feline population in the central and eastern regions of Thailand.

Keyword: Feline Parvovirus, Feline distemper, Canine Parvovirus type 2, VP2 gene, genetic variation

Introduction

The Feline Parvovirus (FPV) can cause disease in felids, including both domestic and wild animals, within the Suborder *Feliformia* and Suborder *Caniformia*, such as raccoons and foxes. However, it does not cause disease in domestic dogs (Yang *et al*., 2021). FPV belongs to the *Parvoviridae* family, *Parvovirinae* subfamily, and *Protoparvovirus* genus, classified under the *Carnivore protoparvovirus-1* species along with *Canine parvovirus-2* (CPV-2), *Mink enteritis virus* (MEV), and *Raccoon parvovirus* (RPV) (Cotmore *et al*., 2019). Feline Parvovirus (FPV) is a small, non-enveloped virus with a spherical capsid. Its genetic material consists of linear, single-stranded DNA approximately 5.1 kb in length. The genome contains two open reading frames (*ORFs*): *ORF-1* encodes two non-structural proteins, NS1 and NS2, while *ORF-2* encodes two structural proteins, VP1 and VP2 (Christensen & Tattersall, 2002). VP2 is the major component of the viral capsid, accounting for 90% of the viral particle. It plays a crucial role in determining the virus's antigenic properties and inducing the production of neutralizing antibodies. Additionally, VP2 is associated with the genetic diversity of the virus and is responsible for defining the host range and receptor binding properties of FPV (Steinel *et al*., 2000). Feline Parvovirus (FPV), also known as Feline distemper or Feline Panleukopenia, is a viral disease that induced severe enteritis. It is commonly found in young cats and primarily affects the digestive system. This disease can occur in all breeds of domestic cats and other feline species (Horiuchi *et al*., 1998). Additionally, it has been found in other animal families, such as skunks, ferrets, minks, and raccoons. In adult cats, the symptoms of Feline distemper or FPV are often mild or unnoticeable. However, in unvaccinated kittens, the symptoms are more pronounced. The most susceptible age range for infection is between 3 to 5 months. In some cases, sudden death may occur in kittens between 4 weeks and 1 year old. Common

symptoms of Feline parvovirus infection include high fever, lethargy, loss of appetite for 3–4 days, vomiting of yellowish fluid, severe dehydration, diarrhea (sometimes with fresh blood), and foul-smelling feces. Cats may develop oral ulcers, tremors, or seizures in severe cases. Furthermore, affected cats may have a lower-than-normal body temperature. The pregnant cats infected with the virus may experience miscarriage. Without timely treatment, the disease can be fatal (Battilani *et al*., 2011; Barrs, 2019). Then, Feline Parvovirus is one of a member in the *Carnivore protoparvovirus 1* group. Studies indicate that approximately 95% of infected cats contract Feline parvovirus (FPV), while the remaining 5% may be infected with Canine Parvovirus (CPV), particularly the CPV-2a, CPV-2b, and CPV-2c variants (Ikeda *et al.*, 2000 and Inthong *et al.*, 2019). Interestingly, cases of co-infection with both FPV and CPV have been reported in the same cat. A notable case was documented by Battilani (2011) and colleagues, who reported a 3-month-old mixed-breed kitten in Italy infected with both FPV and CPV-2a. The kitten ultimately succumbed to severe clinical symptoms associated with Feline distemper. At present, FPV outbreaks can occur throughout the year, unlike in the past when the disease was predominantly prevalent only in winter (Kolappan, 2023). The aforementioned data indicate that information regarding FPV in Thailand remains quite limited, particularly in terms of molecular genetics, which provides insight into the genetic diversity of FPV.

Objectives

This study aims to determine the prevalence of feline viral enteritis caused by Feline Parvovirus (FPV) or Feline distemper in cats found in the central and eastern regions of Thailand. The cat samples were collected from November 2022 to April 2024, covering a total period of 1 year and 6 months and determined FPV-infection with the different diagnostic method compared with a commercial rapid test kit for disease screening and detecting the *VP2* gene of both FPV and CPV-2 by PCR. Finally, the genetic variation of Feline Parvovirus was performed by nucleotide sequencing to assess genetic diversity currently.

Genetic variations of FPV has influence to severity, cross-species transmission, and host specificity. Regular genetic surveillance of the virus will help tracking the evolution of FPV and CPV-2, providing valuable insights for improving prevention against FPV infection in cats. Moreover, this findings serve as a foundation for future research in related fields.

Materials and Methods

1. Ethical statement of the study

This research has obtained approval in accordance with the ethical guidelines and regulations for the use of experimental animals in research at Rajamangala University of Technology Tawan-ok (IRD RMUTTO) and has been granted an animal research permit with the license number U1-00943-2558. The study strictly adheres to the ethical regulations experimental animals in research at Rajamangala University of Technology Tawan-ok, ensuring compliance with animal welfare principles. Sample collection was conducted with care and in a manner that ensured both the physical and psychological well-being of the animals. Additionally, cat owners were informed about the objective of the study, and their consent was voluntarily obtained before any sample collection was carried out.

2. Randomized cat samples

The research team employed purposive sampling, selecting samples based on the discretion and judgment of veterinarians to determine whether the subjects were suitable and representative for the study. Fecal samples were collected exclusively from cats exhibiting clinical symptoms of Feline parvoviral enteritis or FPV. The clinical symptoms considered included diarrhea, lethargy, and fever, with diarrhea being the predominant and essential symptom in all selected cats.

3. Collecting fecal swab samples from domestic/ stray cats

Collecting samples of cats showing gastrointestinal symptoms, particularly with prominent diarrhea, resembling FPV infections, in the cat population found in the central

and eastern regions of Thailand. This included the districts of Sriracha, Chonburi, Ayutthaya, Ang Thong, and Bangkok respectively. The cats have been treated at private pet clinics or animal hospitals. Fecal samples were be collected from both pet and stray cats and tested for feline parvovirus or feline distemper infection to determine the prevalence of the disease. This study look take place over a period of 1 year and a half, from November 2022 to April 2024. The 40 fecal swab samples of 280 cats suspected of FPV were chosen for analysis. The fecal swab were stored at 4°C no more than 48 hours or at -20°C if storage exceeded 48 hours. Each fecal samples were homogenized in 1 mL of phosphate-buffered saline (PBS) at pH 7.4. They were then centrifuged at 8,000 g for 10 minutes at 4°C using a refrigerated centrifuge. The supernatant was collected and stored at -80°C for further analysis.

4. Screening of Feline Parvovirus infection (FPV/CPV-2) with the commercial rapid test Kit

Collected fecal swab samples from each cats exhibiting symptoms of diarrhea suspected to be caused by FPV was screening. The commercial rapid antigen test kit for FPV, the Bionote® (CCV/CPV) test kit was used to differentiate FPV infection from other digestive diseases, such as Feline Coronavirus infection (CCV), severe bacterial infections of the gastrointestinal tract, intestinal parasitic infestations, or protozoa infection, which may present with similar symptoms as gastrointestinal disorders. However, some cats were not screened due to certain owner-related factors.

5. Primer design

The primers used in this study consisted of two pairs: FPV-F/R and CPV-2F/R. These primers were specifically designed for detecting FPV and CPV-2 using the conventional PCR method. They are highly specific to the *VP2* gene of each viral strain. The details of the primers were shown in Table 1.

6. DNA extraction

DNA extraction was performed on all collected test samples using the commercial GF-1 Viral Nucleic Acid Extraction Kit (Vivantis, Malaysia) following the manufacturer's instructions. The process began by adding 50 µL of Proteinase K to 200 µL of the sample, mixing thoroughly, and then adding 200 µL of Buffer VL along with 15 µL of DNA, making a total volume of 215 µL. The mixture was homogenized and incubated at 65°C for 10 minutes to facilitate sample lysis. Next, 280 µL of absolute ethanol was added, and the mixture was immediately shaken to prevent nucleic acid precipitation by ethanol. The sample was then transferred to a GF-1 column and centrifuged at 5,000 g for 1 minute. The column was subsequently washed with 500 µL of Wash Buffer 1 and centrifuged at 5,000 g for 1 minute. This was followed by two washes with 500 µL of Wash Buffer 2, with the first wash being centrifuged at 5,000 g for 1 minute and the second at 14,000 g for 3 minutes. After washing, the filter was removed from the column and transferred to a new 1.5 mL microcentrifuge tube. DNA elution was performed by adding 25 µL of Elution Buffer, incubating at room temperature for 2 minutes, and centrifuging at 5,000 g for 1 minute. This elution step was repeated with another 25 µL of Elution Buffer, followed by 2 minutes incubation at room temperature and then centrifugation at 5,000 g for 1 minute. The extracted DNA samples were stored at -20°C until further analysis.

Table 1 The primers were used in this experiment

Specific gene	Primers	Sequences (5' 3')	Gene	PCR product (bp)	References
Specific FPV	FPV-F	CATACATGGCAAACAAATAGAGCA	*VP2*	236	(Zhang et al., 2019)
	FPV-R	TGTTTTAAATGGCCCTTGTGTAGA			
Specific CPV-2	CPV-2 (F)	AGCAGATGGTGATCCAAGAT	*VP2*	529	(Torre et al., 2018)
	CPV-2 (R)	TGGATTCCAAGTATGAGAGG			

7. Detection of Feline Parvovirus (FPV) / Canine Parvovirus-2 (CPV-2) Infection by Polymerase Chain Reaction (PCR)

The detection of FPV from fecal swab samples was performed by PCR with specific primers of the *VP2* gene (Table 1). The PCR product was 236 bp in size of FPV and which in 529 bp of CPV-2 respectively. The thermal cycling conditions for DNA amplification were as following: initial denaturation at 94°C for 2 minutes, followed by 34 PCR cycles consisting of denaturation at 94°C for 30 seconds, annealing at 57.7°C for 40 seconds, and extension at 72°C for 40 seconds. A final extension was performed at 72°C for 7 minutes. The PCR products were analyzed using gel electrophoresis on a 1.2% (w/v) agarose gel in Tris-acetate EDTA (1x TAE) buffer at a constant voltage of 50 V for 50 minutes. The gel was then stained with SYBR® Green DNA dye and visualized using a Dark Reader blue light transilluminator (Major Science, Taiwan).

8. DNA purification

The amplified FPV- *VP2* gene obtained from each sample was subjected to DNA purification using the GenepHlow™ Gel/PCR Kit (Geneaid, Taiwan), following the manufacturer's instructions. The DNA purification process consists of four mainly steps as following: the first step was sample preparation, the sample (PCR product) was placed into a 1.5 mL microcentrifuge tube and then added 5 volumes of PCR buffer to 1 volume of the sample (if the sample volume is X, add 5X PCR buffer) with mixed thoroughly. If the mixture turned in purple color, 10 µL of 3M Sodium Acetate (pH 5.0) was added and mixed well. The second was DNA Binding step: to place the DFH column into a 2 mL collection tube and added the preparing DNA sample to the DFH column, then centrifuged at 14,000 g for 45 seconds. After that, the flow-through was discarded and reassembled the DFH column into the collection tube. The third was washing step by adding 600 µL of washed buffer to the center of the DFH Column and leave at room temperature for 1 minute. The DFH Column was centrifuged at 14,000 g for 45 seconds and discarded the flow-through and reassembled the DFH Column into the collection tube, then the DFH Column was centrifuged repeat at 14,000 g for 3 seconds to dry the column. Finally, DNA Elution: the DFH Column was transferred into a 1.5 mL microcentrifuge tube. Then, 50 µL of elution buffer was added at 65°C into the center of the column (separate to each round of 25 µL) and left for 2 minutes until the elution buffer is fully absorbed by the column. Then, the column was centrifuged at 14,000 g for 2 minutes to elute the purified DNA. Afterwards, the DNA was sent to Macrogen Company in South Korea for DNA sequence analysis using Capillary Electrophoresis Sequencing (Sanger Sequencing) on an automated genetic analyzer.

9. DNA Sequencing

The DNA fragments of the FPV strain (VP2-FPV gene) were sent for sequencing of both the Forward and Reverse strands, as well as for analysis of the DNA sequencing. The nucleotide sequence similarity (% Nucleotide similarity) was analyzed by performing a Multiple Alignment comparison of the DNA samples with reference sequences of FPV and CPV-2 from the GenBank database, using the ClustalW method within the MEGALIGN program (DNASTAR).

10. Statistical analysis

All the data obtained from the study were subjected to statistical analysis. The Shapiro-Wilk method was used to test the distribution of numerical data, and the relationship between the prevalence of Feline parvovirus infection in the central and eastern regions of Thailand was analyzed using the Spearman's rank correlation. This analysis aimed to identify factors associated with or influencing the outbreak of the disease. Additionally, the study described the patterns of the disease spread in cats across different seasons within the cat populations of the central and eastern regions of Thailand. The statistical significance was set at $p \leq 0.05$.

Results

1. The prevalence of Feline Parvovirus infection (FPV) or feline distemper, in cats during November 2022 to April 2024 (a total time of 1 year and a half).

Fecal sample of 280 cats exhibiting clinical signs of gastrointestinal disorders including diarrhea, lethargy, fever, and vomiting, with all cats showing prominent diarrhea; were collected from animal hospitals and private pet clinics in the central and eastern regions of Thailand over a period of 1 year and a half (from November 2022 to April 2024). Upon 40 cats were determined positive for FPV infection (Figure 1). This corresponds to a disease prevalence of 14.29% (prevalence = number of infected individuals in a population divided by the total population). The highest prevalence was observed during the winter months in November, December, January, and February. Some cases were detected during the rainy season, while the lowest incidence occurred during the summer. These findings are consistent with the natural infection patterns and historical transmission trends of the virus. The Spearman rank correlation method was used to assess the correlation between the prevalence of FPV and gastrointestinal diseases in cats in the central and eastern regions of Thailand. The results revealed a strong correlation between gastrointestinal diseases and FPV infection, with a correlation coefficient (r) of 0.84 at a significance level of 0.05 (Data not shown).

2. Confirmation of Feline Viral Enteritis caused by FPV/ CPV-2 by Conventional PCR

A total of 40 fecal swab samples were determined the *VP2* gene of FPV and CPV-2 using the conventional PCR. Specific primers targeting the *VP2* gene of each virus strain were employed. The *VP2* gene of FPV was a DNA fragment of 236 bp in size, while the *VP2* gene of CPV-2 produces a 529 bp of PCR product size. The results showed that only *VP2*-FPV gene was detected. However, *VP2*-CPV-2 gene was negative in all samples. Of the 40 total samples, 30 were positive for the *VP2* gene of FPV, representing 75% (30/40). The distribution of positive samples by province is as follows: Chonburi: 100% positive (17/17), Ayutthaya: 50% positive (1/2), Bangkok: 100% positive (1/1) and Ang Thong: 55% positive (11/20) respectively. The *VP2*-FPV gene was performed on gel electrophoresis and PCR products of 236 bp was shown in Figure 2.

3. Comparative of diagnostic methods for Feline Parvovirus (FPV) infection between rapid commercial Immunochromatographic Test (IC Test) and *VP2* gene detection by Polymerase Chain Reaction (PCR)

Total of 40 feline fecal swab samples were collected from animal hospitals and private veterinary clinics in the central and eastern regions of Thailand: thirty-six samples were identified for FPV infection using a commercial rapid immunochromatographic test kit, excluding 4 samples were not tested by IC. Of these, 26 samples were tested positive for FPV while 10 samples were tested negative. Then, all of 40 feline fecal swab samples were also examined for FPV and CPV2 infection using polymerase chain reaction (PCR) targeting each strain of *VP2* gene. PCR results showed 30 positive and 10 negative samples of FVP infection (Table 2). However, all of them were negative of CPV-2 infection. Based on these findings, the sensitivity of the rapid screening test or IC test (defined as the proportion of true positives detected among all actual cases) was 62.96% (17/27). The positive predictive value (PPV), which is the proportion of true positive results among all positive test results, was 65.38% (17/26). Therefore, the commercial rapid test kit of FPV or IC test was 62.96% of sensitivity and 65.38% of PPV ratio when compared with the gold standard method such as PCR.

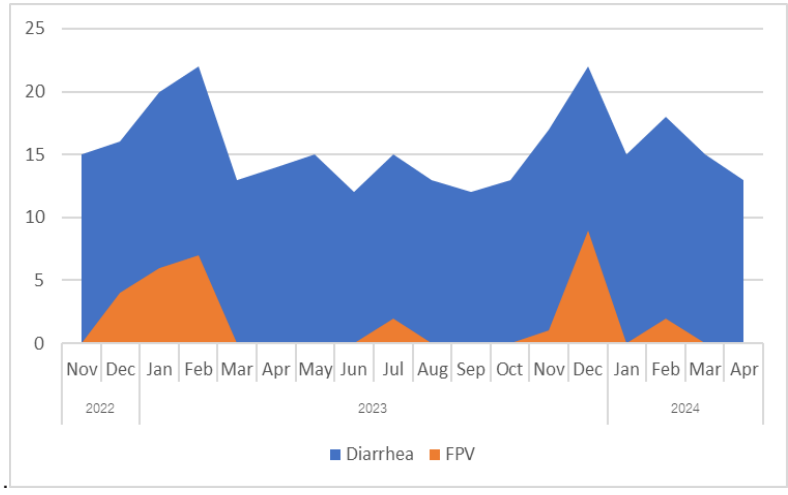
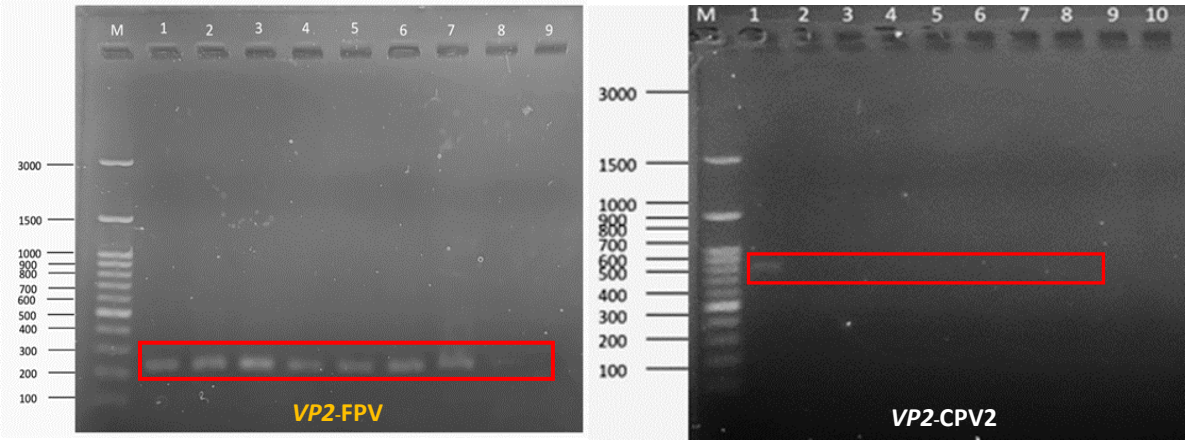


Figure 1 A chart illustrating a comparison between the number of cats exhibiting gastrointestinal symptoms (Blue color) and the number of cats diagnosed with Feline parvovirus virus (FPV) infection (Orange color), recorded from November 2022 to April 2024, covering a total period of 1 year and a half. X bar represented each month of year which was collecting cat samples or the period of the experiment. Y bar represented the number of cat samples.

Note: The total number of cat samples (N) = 280, and the number of FPV-infected samples (N) = 40



2A **2B**

Figure 2 Gel electrophoresis showed FPV detection in cat samples using specific primers of the *VP2* gene.

Figure 2A demonstrated the PCR product of *VP2*-FPV was 236 bp in size. The lanes were labeled as following: Lane M represented the 3,000 bp DNA marker ladder, Lane 1 contained the Felocell CVR® vaccine, which served as positive control. Lanes 2 to 6 corresponded to samples C01–C05, respectively. Lanes 7 and 8 represented sample C18, and Lane 9 was the negative control.

Figure 2B represented the PCR product of *VP2*-CPV2 was 529 bp. The lanes were labeled as following: Lane M represented the 3,000 bp DNA marker ladder, Lane 1 contained the BayovacDHPPi/L® vaccine served as positive control. Lanes 2 to 6 corresponded to samples C01–C05, respectively. Lanes 7 and 8 represented sample C18, and Lane 9 was the negative control.

Table 2 Comparison of diagnostic methods between a commercial rapid test kit (Immunochromatography or IC test) and Polymerese Chain Reaction (PCR) for FPV detection from 40 cats in Central and Eastern regions of Thailand.

Province /Diagnostic method	Positive IC test	Negative IC test	Total number of sample	Positive VP-2 /FPV PCR	Negative VP-2 /FPV PCR	Total number of sample
Chonburi	13	3	16	17	0	17
Ayutthaya	1	1	2	1	1	2
Ang Thong	11	6	17	11	9	20
Bangkok	1	0	1	1	0	1
FPV-infection ratio	26/36	10/36	36	30/40	10/40	40

4. DNA sequence analysis of the *VP2* gene of Feline Parvovirus (FPV) obtained from cats infected-FPV in the central and eastern regions of Thailand, compared with reference *VP2* gene of FPV/CPV-2 from GenBank database

A 236 bp of the *VP2* gene of feline parvovirus (FPV), obtained from PCR-positive feline fecal samples, was amplified and purified for nucleotide sequencing. The resulting sequences were compared with reference *VP2*-FPV gene sequences available in the GenBank database using the MegAlign program (DNASTAR). The analysis revealed that the nucleotide sequences of all the *VP2* gene fragments obtained from the samples were identical to those of four-reference FPV strains such as FPV/G1/Vaccine/ Italy/ 2008/EU498681, FPV/G3D/Cat/China/2021/MK 671150, FPV/G2/Cat/Canada/2018/OM64009 and FPV-G3C-1/Cat/Thailand/2020/MW589473). The result showed there was no nucleotide variation, nor any similarity to the *VP2* gene of Canine Parvovirus (CPV). These findings suggested that feline parvovirus infections in the central and eastern regions of Thailand are still caused by the original FPV strain, or ancestral FPV viruses, rather than by variants such as CPV-2 (Figure 3).

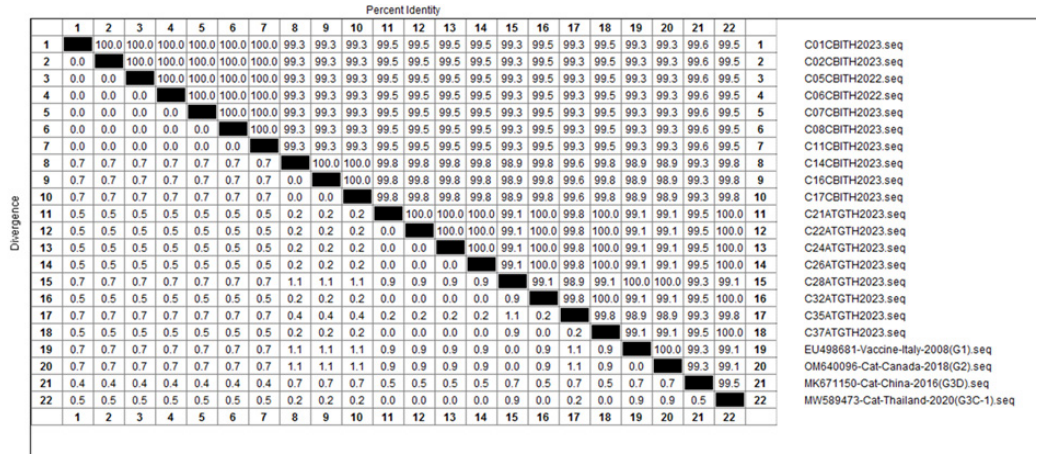


Figure 3 The percentage of nucleotide similarity (% nucleotide similarity) of the partial *VP2* gene (236 bp) was conducted by comparison with four representative FPV strains retrieved from the GenBank database (FPV/G1/Vaccine/ Italy/ 2008/EU498681, FPV/G2/Cat/Canada/2018/OM64009, FPV/G3D/Cat/China/2021/MK 671150, FPV-G3C-1/Cat/Thailand/2020/MW589473) using the ClustalW Method within the MEGALIGN program (DNASTAR)

Discussion

This study underscores the pivotal role of Feline Parvovirus (FPV) or Feline Panleukopenia as the primary etiological agent responsible for feline enteritis, particularly in the central and eastern regions of Thailand. The notably high FPV detection rate (75%) among the collected samples reflects the substantial prevalence of the virus within the feline population in these areas. These findings align with previous reports, which characterize FPV as a highly transmissible and globally widespread pathogen affecting domestic cats (Pacini *et al.*, 2023). Furthermore, the results confirmed that FPV continues to be the predominant parvovirus infecting domestic cats in the central and eastern parts of Thailand, with no detection of Canine Parvovirus type 2 (CPV-2) in the tested specimens. This observation contrasts with previous findings reported by Inthong et al. (2020), who identified FPV in canine samples collected from the Bangkok metropolitan area. Additionally, Wang *et al.* (2024) documented the co-circulation of FPV and CPV-2c as causative agents of FPV in cats from eastern Shandong Province, China, during 2021–2022. In another study, Wang *et al.* (2022) examined the prevalence of CPV-2 in 192 canine samples from southwestern China and found that 113 samples were CPV-2 positive. Among these, 28 samples (24.8%) were identified as FPV-like viruses. Collectively, these findings suggested regional variation in molecular epidemiology of FPV was recognized. Continuous molecular surveillance is therefore imperative to monitor viral genetic diversity and to detect potential emergent strains that may drive future outbreaks. In Thailand, the data of genetic diversity of FPV remain limited, hindering a comprehensive understanding of its epidemiology, including prevalence, geographic distribution, and potential outbreak sources. These data are essential for veterinarians, relevant authorities, and pet owners to develop and implement effective strategies for the prevention and control of FPV transmission in the country's feline population. In this study, fecal samples were collected from cats exhibiting clinical signs specifically indicative of disease. A total of 36 samples underwent initial screening using a rapid immunochromatographic (IC) test prior to confirmation of FPV infection by conventional PCR. The results showed that 17 samples tested positive by both IC test and PCR, while 10 samples tested negative by IC test but were positive by PCR. When calculating the sensitivity of the IC test, the value was found to be 62.96%. From these results, it suggested that the FPV-suspected samples were collected from various veterinary clinics across different regions, without a predetermined sample size and by multiple sample collectors. The false-negative IC test results could be attributed to a low viral load in the collected samples or testing performed during the early stage of infection. However, when these samples were subjected to PCR after amplification of viral genetic material, positive results were obtained. Additionally, there were 9 samples that yielded false-positive results. It showed that testing of 9 samples were positive by IC test but negative by PCR. The positive predictive value (PPV) of the IC test was calculated to be 65.38%, indicating the probability that a positive IC test result truly reflected FPV infection when compared to PCR. This PPV suggests that some animals testing positive by IC test may not actually be infected (Ingsatit, 2024). The discrepancies in this study may be due to variations in sample collection across provinces, differences in personnel collecting the samples, and the use of different test kits in each area so these factors that may contribute to diagnostic inaccuracies.

Conclusion

This study investigated the prevalence and genetic variation of Feline parvovirus (FPV) causing viral enteritis in cats in the central and eastern regions of Thailand. Screening for FPV infection was conducted using an immunochromatographic (IC) test, and the results were compared with those obtained from polymerase chain reaction (PCR), which served as the gold standard for diagnostic confirmation. The findings revealed that the prevalence of feline parvoviral enteritis or FPV followed a consistent seasonal trend in both regions, with the highest incidence observed during the winter months particularly in November, December, January, and February. December recorded the peak

occurrence of FPV outbreak. The IC test demonstrated a diagnostic accuracy of 65.38% when compared with PCR. Genetic analysis of the viral DNA extracted from all 30 PCR-positive fecal samples indicated that all sequences corresponded to FPV and exhibited 100% similarity with reference FPV sequences available in the GenBank database. No evidence of cross-species transmission involving canine parvovirus type 2 (CPV-2) from dogs to cats was detected. These results suggested that FPV strains circulating in the central and eastern regions of Thailand currently exhibit low genetic diversity. This information supports the continued efficacy of existing FPV vaccines. Furthermore, ongoing surveillance and genetic monitoring of FPV are essential for informing the development of effective vaccines tailored to emerging viral strains and optimizing strategies for the prevention of feline parvoviral enteritis in Thailand.

Acknowledgement

This research was received the grant from IRD of Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi, 20110, Thailand in 2024.

References

Barrs, V. R. (2019). Feline panleukopenia: A re-emergent disease. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, *49*(4), 651–670. https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2019.02.006

Battilani, M., Balboni, A., Ustulin, M., Giunti, M., Scagliarini, A., & Prosperi, S. (2011). Genetic complexity and multiple infections with more *Parvovirus* species in naturally infected cats. *Veterinary Research*, *42*(1), Article 43.

Christensen, J., & Tattersall, P. (2002). Parvovirus initiator protein NS1 and RPA coordinate replication fork progression in a reconstituted DNA replication system. *Journal of Virology*, *76*(13), 6518–6531.

Cotmore, S. F., Agbandje-McKenna, M., Canuti, M., Chiorini, J. A., Eis-Hubinger, A. M., Hughes, J., Mietzsch, M., Modha, S., Ogliastro, M., Pénzes, J. J., Pintel, D. J., Qiu, J., Soderlund Venermo, M., Tattersall, P., & Tijssen, P. (2019). ICTV virus taxonomy profile: Parvoviridae. *Journal of General Virology*, *100*(3), 367–368.

Horiuchi, M., Yamaguchi, Y., Gojobori, T., Mochizuki, M., Nagasawa, H., Toyoda, Y., Ishiguro, N., & Shinagawa, M. (1998). Differences in the evolutionary pattern of feline panleukopenia virus and canine parvovirus. *Virology*, *249*(2), 440–452.

Ikeda, Y., Mochizuki, M., Naito, R., Nakamura, K., Miyazawa, T., Mikami, T., & Takahashi, E. (2000). Predominance of canine parvovirus (CPV) in unvaccinated cat populations and emergence of new antigenic types of CPVs in cats. *Virology*, *278*(1), 13–19. https://doi.org/10.1006/viro.2000.0653

Ingsatit, A. (2024). *Evidence-based medicine on diagnostic study*. Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University. https://www.rama.mahidol.ac.th/fammed/sites/default/files/public/pdf/EBM_Diagnostic_study

Inthong, N., Kaewmongkol, S., Meekhanon, N., Sirinarumitr, K., & Sirinarumitr, T. (2020). Dynamic evolution of canine parvovirus in Thailand. *Veterinary World*, *13*(2), 245–255.

Inthong, N., Sutacha, K., Kaewmongkol, S., Sinsiri, R., Sribuarod, K., Sirinarumitr, K., & Sirinarumitr, T. (2019). Feline panleukopenia virus as the cause of diarrhea in a banded linsang (*Prionodon linsang*) in Thailand. *Journal of Veterinary Medical Science*, *81*(12), 1763–1768.

Kolappan, B. (2023, November 19). *Feline parvovirus affecting cats and kittens on the rise*. The Hindu. https://www.thehindu.com/news/national/tamil-nadu/feline-parvovirus-affecting-cats-and-kittens-on-the-rise/article67427451.ece

Pacini, M. I., Forzan, M., Franzo, G., Tucciarone, C. M., Fornai, M., Bertelloni, F., Sgorbini, M., Cantile, C., & Mazzei, M. (2023). Feline parvovirus lethal outbreak in a group of adult cohabiting domestic cats. *Pathogens*, *12*(6), Article 822.

Steinel, A., Munson, L., van Vuuren, M., & Truyen, U. (2000). Genetic characterization of feline parvovirus sequences from various carnivores. *Journal of General Virology*, *81*(2), 345–350.

Torre, D., Mafla, E., Puga, B., Erazo, L., Astolfi-Ferreira, C., & Piantino Ferreira, A. (2018). Molecular characterization of canine parvovirus variants (CPV-2a, CPV-2b, and CPV-2c) based on the *VP2* gene in affected domestic dogs in Ecuador. *Veterinary World*, *11*(4), 480–487. https://doi.org/10.14202/vetworld.2018.480-487

Wang, J., Chen, X., Zhou, Y., Yue, H., Zhou, N., Gong, H., & Tang, C. (2022). Prevalence and characteristics of a feline parvovirus-like virus in dogs in China. *Veterinary Microbiology*, *270*, Article 109473.

Wang, J., Yan, Z., Liu, H., Wang, W., Liu, Y., Zhu, X., Tian, L., Zhao, J., Peng, Q., & Bi, Z. (2024). Prevalence and molecular evolution of parvovirus in cats in eastern Shandong, China, between 2021 and 2022. *Transboundary and Emerging Diseases*, *24*, 1–14.

Yang, S., He, Y., Chen, X., Kalim, U., Wang, Y., Yang, S., Qi, H., Cheng, H., Lu, X., Wang, X., Shen, Q., & Zhang, W. (2021). Viral metagenomics reveals diverse viruses in the feces samples of raccoon dogs. *Frontiers in Veterinary Science*, *8*, Article 693564.

Zhang, Q., Niu, J., Yi, S., Dong, G., Yu, D., Guo, Y., Huang, H., & Hu, G. (2019). Development and application of a multiplex PCR method for the simultaneous detection and differentiation of feline panleukopenia virus, feline bocavirus, and feline astrovirus. *Archives of Virology*, *164*(11), 2761–2768. https://doi.org/10.1007/s00705-019-04394-8

ปริมาณและมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบบริเวณหาดม่วงงาม ตำบลม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา

Quantity and harvesting value of wedge clams (*Donax* spp.) at Muang Ngam Beach, Muang Ngam Subdistrict, Singhanakhon District, Songkhla Province

นรันต์ ณัฏฐารมณ์, กริ่งผกา วังกุลางกูร และเสาวลักษณ์ รุ่งตะวันเรืองศรี
Narun Nattharom, Kringpaka Wangkulangkul and Saowalak Roongtawanreongsri
Received: 5 June 2023 ; **Revised**: 28 January 2024 ; **Accepted**: 2 July 2025

บทคัดย่อ

หอยเสียบ (Wedge clams) ในสกุล *Donax* มีความสำคัญต่อระบบนิเวศหาดทรายและต่อชุมชนชายฝั่งในด้านการเป็นแหล่งอาหารและรายได้เสริม งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินมูลค่ารายได้ทางตรงและมูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบ โดยเก็บข้อมูลสำหรับประเมินมูลค่ารายได้ทางตรงจากการสัมภาษณ์ผู้เก็บหาหอยเสียบในชุมชนด้วยแบบสอบถาม และเก็บข้อมูลการประเมินมูลค่าศักยภาพด้วยวิธีการสำรวจทางชีววิทยาบริเวณชายหาด 2 ครั้งในช่วงเวลาน้ำเกิด (spring tide) และช่วงเวลาน้ำตาย (neap tide) ผลการศึกษาพบหอยเสียบทั้งหมด 3 ชนิด คือ *Donax faba D. cuneatus* และ *D. incarnatus* การเก็บหาหอยเสียบเพื่อการจำหน่ายของคนในชุมชนนิยมจำแนกหอยเสียบออกตามขนาดโดยไม่แยกชนิด มีมูลค่าผลประโยชน์สุทธิรวมของการเก็บหาเท่ากับ 154,359.38 บาท/ปี เฉลี่ย 9,079.96 ต่อคนต่อปี ในส่วนปริมาณศักยภาพ ในช่วงเวลาน้ำเกิด พบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของ *D. faba* เท่ากับ 11.6±1.85 ตัว/ตารางเมตร และ *D. incarnatus* เท่ากับ 6±1.21 ตัว/ตารางเมตร และช่วงเวลาน้ำตาย พบ *D. cuneatus* เท่ากับ 2.13±0.76 ตัว/ตารางเมตร และ *D. incarnatus* เท่ากับ 0.67±0.28 ตัว/ตารางเมตร ซึ่งคำนวณเป็นมูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบบนพื้นที่หาดแห่งนี้เท่ากับ 716,420.94 บาท/ปี หรือ 247.05 บาท/ตารางเมตร/ปี ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นความสำคัญของหอยเสียบที่มีต่อชุมชนชายฝั่งที่ควรค่าแก่การอนุรักษ์ผ่านการบริหารจัดการหาดทรายและทะเลที่มีความเชื่อมโยงกันตลอดอ่าวไทย เพื่อให้การคงอยู่ของหอยเสียบมีความยั่งยืน

คำสำคัญ: หอยเสียบ, มูลค่าการเก็บหา, มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์, นิเวศชายหาด, ชุมชนชายฝั่ง

Abstract

Wedge clams in the genus *Donax* are crucial bivalves in the sandy beach ecosystem. They play a vital role in the local food chain and provide a source of income for coastal communities. This research aimed to estimate the direct income value and potential harvesting value of wedge clams. Economic data for direct income were collected through interviews with local harvesters, while potential value was assessed using biological surveys during spring and neap tides. The results identified three species: *Donax faba*, *D. cuneatus*, and *D. incarnatus*. Locals typically harvested clams based on size rather than species. The net income from harvesting amounted to 154,359.38 baht/year (averaging 9,079.96 baht/person/year). Regarding potential quantity, average densities during spring tide for *D. faba* and *D. incarnatus* were 11.6 ± 1.85 and 6.0 ± 1.21 ind/m², respectively. During neap tide, densities were 2.13 ± 0.76 for *D. cuneatus* and 0.67 ± 0.28 for *D. incarnatus*. The estimated annual potential harvesting value for this beach area was 716,420.94 baht/year or 247.05 baht/m²/year. These findings highlight the importance of wedge clams to coastal communities and the necessity of their conservation for sustainable utilization.

Keywords: Wedge clams, harvesting value, economic value, coastal ecosystem, coastal communities

---

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยหาดใหญ่

[2] สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[3] คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[1] Faculty of Science and Technology, Hatyai University

[2] Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University

[3] Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University

* Corresponding author, Email: saowalak.ro@psu.ac.th

บทนำ

หอยเสียบ (Wedge clams) เป็นสิ่งมีชีวิตหน้าดินขนาดใหญ่ (macrobenthos) ที่ในปัจจุบันยังถูกมองข้ามความสำคัญทั้งในแง่ของความสมดุลของสิ่งแวดล้อม (สาวิกา กัลปพฤษ์ และสิทธิ กุหลาบทอง, 2556; Tenjing, 2007) และแง่ของเศรษฐกิจและวิถีชีวิตของชุมชน โดยเฉพาะบริเวณชุมชนชายฝั่ง เพราะเป็นแหล่งรายได้เพื่อนำไปจำหน่าย (เสถียรพงษ์ ขาวหิต และ เกษม จันทร์แก้ว, 2559) และแหล่งอาหารของคนในชุมชนสำหรับใช้ในการประกอบอาหารรูปแบบต่าง ๆ (Özden *et al*., 2009)

หอยเสียบสกุล *Donax* มักพบบริเวณชายฝั่งในระบบนิเวศหาดทรายหรือหาดทรายปนโคลนบริเวณคลื่นกระทบฝั่ง (swash zone) (Varadharajan *et al*., 2009) มีพฤติกรรมฝังตัวในพื้นทะเลและยื่นท่อน้ำ (siphon) ออกมาเพื่อกรองกินอาหาร (filter feeding) (DeLancey, 1999) ในประเทศไทยมีรายงานว่าพบหอยเสียบ 8 ชนิด(Signorelli & Printrakoon, 2020) ซึ่งมีแนวโน้มถูกคุกคามจากกิจกรรมโครงการพัฒนาชายหาด โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย เช่น การก่อสร้างรุกล้ำลำน้ำ (คณะกรรมการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งจังหวัดสงขลา, 2560) การก่อสร้างแนวกันคลื่น (Basco, 2006; คณะกรรมการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งจังหวัดสงขลา, 2560) เป็นต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ชายหาดอันเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของหอยเสียบ

แม้หอยเสียบจะมีคุณค่าทั้งทางด้านนิเวศและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจ แต่กลับพบว่างานวิจัยในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับหอยเสียบน้อยมาก และส่วนใหญ่เป็นการศึกษาหอยเสียบในประเด็นทางนิเวศวิทยา (เกื้อ ฤทธิบูรณ์ และคณะ, 2562; ณัฐฌาชิตา ชูเกิด และคณะ, 2564; Tantikamton *et al*., 2017; Yucharoen *et al*., 2020) และการศึกษาทางพันธุกรรม (Manatrinon *et al*., 2012; Supmee *et al*., 2021) ทั้งนี้ ยังไม่พบงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของหอยเสียบ

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาชนิดของหอยเสียบและคำนวณมูลค่าของหอยเสียบในรูปของรายได้ทางเศรษฐกิจที่ประชาชนได้รับจากการเก็บหาหอยเสียบ โดยศึกษาทั้งมูลค่าที่เกิดขึ้นแล้วและมูลค่าที่เป็นศักยภาพด้วย ซึ่งถือเป็นมูลค่าขั้นต้นเพื่อปูทางไปสู่การให้ความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตนี้และนำไปสู่การประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของประโยชน์จากระบบนิเวศ (ecosystem services) ด้านอื่น ๆ ของหอยเสียบต่อไปในอนาคต โดยศึกษากรณีตัวอย่างจากพื้นที่ชายหาดม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ยังคงมีคนในชุมชนประกอบอาชีพเก็บหาหอยเสียบ โดยผลการศึกษาที่ได้นั้นนอกจากจะเป็นข้อมูลที่สะท้อนให้เห็นถึงผลประโยชน์ในรูปของตัวเงินของหอยเสียบที่มีต่อมนุษย์แล้ว ข้อมูลดังกล่าวยังเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานหรือองค์กรต่าง ๆ ที่สามารถนำผลการศึกษาครั้งนี้ไปใช้เพื่อการประกอบการตัดสินใจดำเนินนโยบายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติหรือการพัฒนาชายหาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งชายหาดบริเวณอ่าวไทยที่มีหอยเสียบเป็นจำนวนมากให้เกิดความยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

หาดม่วงงาม ตำบลม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ตั้งอยู่บนพิกัด 7°22’34.48” เหนือ ถึง 100°28’ 50.80” ตะวันออก และ 7°19’31.78” เหนือ ถึง 100°30’14.78” ตะวันออก (Figure 1) เป็นแนวหาดยาว 6.2 กิโลเมตร ติดกับทะเลอ่าวไทยในเขตตำบลม่วงงาม ผู้วิจัยเลือกแนวชายหาดนี้เนื่องจากเป็นชายหาดที่คนในชุมชนและนักท่องเที่ยวนิยมมาเก็บหาหอยเสียบและยังไม่ได้รับผลกระทบจากการกัดเซาะชายฝั่งจากทั้งกิจกรรมตามธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์มากนัก (คณะกรรมการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งจังหวัดสงขลา, 2560) เพื่อจะได้เป็นตัวแทนของศักยภาพของหอยเสียบได้ และผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาทางเลือกกิจกรรมบริเวณชายหาดม่วงงามได้ในอนาคต

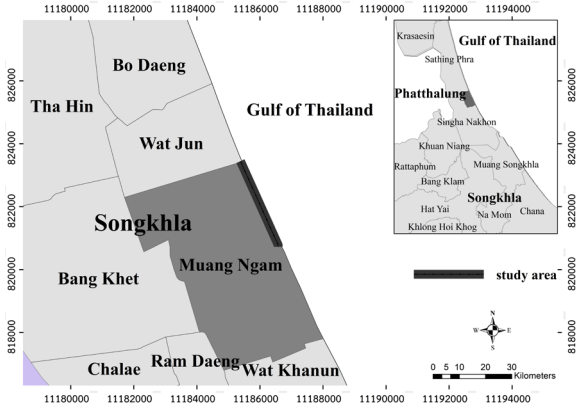


Figure 1 The study area: Muang Ngam Beach in Muang Ngam Subdistrict, Songkhla Province

หาดม่วงงามมีลักษณะเป็นหาดทราย โดยอนุภาคทรายบริเวณเขตน้ำขึ้นน้ำลงมีขนาดกลางถึงหยาบ (medium to coarse sand) รูปแบบของน้ำขึ้นน้ำลงเป็นแบบน้ำผสม (mixed tides) ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่ส่งผลให้เกิดคลื่นลมและฝนตกในช่วงประมาณกลางเดือน

ตุลาคม-กลางเดือนกุมภาพันธ์ และได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชั่น (tropical depression) และคลื่นลมค่อนข้างสงบในประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์-กลางเดือนตุลาคม (คณะกรรมการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งจังหวัดสงขลา, 2560)

2. การคำนวณมูลค่าหอยเสียบ

ในทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม หอยเสียบมีมูลค่าไม่เพียงเฉพาะทางด้านการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจเท่านั้น แต่ยังมีมูลค่าการให้ประโยชน์ในทางระบบนิเวศด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการคำนวณมูลค่าของหอยเสียบที่มีต่อระบบนิเวศต้องอาศัยข้อมูลเชิงลึกทางชีววิทยาและนิเวศวิทยา ซึ่งในขณะนี้ยังมีข้อมูลเหล่านั้นไม่เพียงพอ ดังนั้น การคำนวณมูลค่าหอยเสียบในครั้งนี้จะคำนวณเฉพาะมูลค่าด้านการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจจากหอยเสียบ ซึ่งเป็นมูลค่าทางตรง (direct value) เท่านั้น ซึ่งสามารถสะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์ของหอยเสียบที่มีต่อมนุษย์ โดยการศึกษาครั้งนี้จะสะท้อนให้เห็นมูลค่าด้านนี้ใน 2 ส่วน ดังนี้

2.1 มูลค่ารายได้จากการเก็บหาหอยเสียบเพื่อจำหน่ายตามที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างพิจารณาเฉพาะผู้เก็บหาหอยเสียบเพื่อจำหน่ายทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาโดยไม่สุ่มเลือก โดยใช้แบบสอบถามประกอบการสัมภาษณ์เป็นเครื่องมือ โดยมีข้อคำถามประกอบด้วย ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบ เทคนิควิธีการเก็บหาหอยเสียบ ปริมาณของหอยเสียบที่เก็บหาได้ในแต่ละเดือนตลอด 1 รอบปี รูปแบบและราคาจำหน่ายของหอยเสียบ และต้นทุนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเก็บหา โดยช่วงเวลาในการสัมภาษณ์ ได้แก่ ช่วงน้ำลงในตอนเช้า (6.00-10.00 น.) และช่วงน้ำลงในตอนบ่าย (15.00-18.00 น.) โดยสัมภาษณ์ผู้เก็บหาหอยเสียบแต่ละรายจนครบทั้งชุมชนในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2564 ข้อมูลเกี่ยวกับการเก็บหาหอยเสียบที่เก็บรวบรวมมาได้ทั้งหมด จะถูกนำมาตรวจสอบ จำแนก และนำเข้าสู่โปรแกรมช่วยการคำนวณ เพื่อหามูลค่าผลประโยชน์สุทธิของการใช้ประโยชน์หอยเสียบของชุมชน โดยมีรายละเอียดดังสมการที่ 1

$$NB = \sum[(P \times Q_i) - C_i] \quad (1)$$

เมื่อ

NB = มูลค่าผลประโยชน์สุทธิของการเก็บหาหอยเสียบของชุมชน (บาทต่อปี)

P = ราคาเฉลี่ยของหอยเสียบที่ซื้อขายในตลาดท้องถิ่น (บาทต่อกิโลกรัม)

Q = ปริมาณหอยเสียบทั้งหมดที่ผู้เก็บหาแต่ละคนจับได้ (กิโลกรัมต่อปี)

C = มูลค่าต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการเก็บหาหอยเสียบของผู้เก็บหาแต่ละคน (บาทต่อปี)

i = ผู้เก็บหาหอยเสียบ รายที่ 1 ถึง i

2.2 มูลค่าศักยภาพของการเก็บหาหอยเสียบ

มูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบ หมายถึง มูลค่าสุทธิที่จะเกิดขึ้นหากมีการเก็บหาหอยเสียบทั้งหมดที่มีอยู่บนหาดไปจำหน่ายในช่วงเวลา 244 วัน ตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนตุลาคม โดยการประเมินมูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบ ใช้วิธีการสำรวจสุ่มตัวอย่างทางนิเวศวิทยาเพื่อประเมินจำนวนของหอยเสียบทั้งหมดที่อยู่ในชายหาดม่วงงาม แล้วนำมาคำนวณมูลค่า ดังนี้

2.2.1 การสำรวจปริมาณหอยเสียบ

กำหนดจุดสำรวจจำนวน 3 สถานี กระจายบนแนวหาดที่คนในชุมชนนิยมเก็บหาหอยเสียบ (Figure 1) ความยาว 2,900 เมตร โดยเลือกช่วงเวลาในการสุ่มเก็บตัวอย่างช่วงเดียวกับช่วงที่คนในชุมชนนิยมเก็บหาหอยเสียบ ซึ่งการสุ่มเก็บตัวอย่างหอยใช้วิธี Line Transect Sampling บริเวณคลื่นกระทบฝั่ง (swash zone) ความกว้าง 1 เมตร โดยวางกรอบสำรวจ (quadrat) ขนาด 0.5 x 0.5 เมตร (0.25 ตารางเมตร) จำนวน 10 ซ้ำ แต่ละซ้ำห่างกัน 10 เมตร (Figure 2) จากนั้น ขุดทรายในกรอบสำรวจลึก 10 เซนติเมตร แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาดตา 0.5 มิลลิเมตร เพื่อคัดหอยเสียบออกจากตะกอนทราย แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (กรัม) และวัดขนาด (มิลลิเมตร) ในห้องปฏิบัติการ

การสำรวจปริมาณหอยเสียบมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถสำรวจได้ตลอดปี เพราะจากการทบทวนเอกสารยังไม่พบเอกสารงานวิจัยที่อธิบายถึงวงจรชีวิตและการมาฝังตัวบริเวณชายหาดของหอยเสียบ การสำรวจปริมาณหอยเสียบบริเวณชายหาดในการศึกษาครั้งนี้ จึงอาศัยภูมิปัญญาของคนในชุมชนที่อธิบายว่าหอยเสียบมักฝังตัวบริเวณชายหาดในช่วงระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนตุลาคม การสำรวจจึงดำเนินการเพียง 2 ครั้ง ในช่วงเดือนมิถุนายน (16 และ 29 มิถุนายน 2564) เนื่องจากช่วงเดือนดังกล่าวเป็นช่วงที่คลื่นลมบริเวณชายหาดแห่งนี้สงบที่สุดในรอบปี การสุ่มเก็บตัวอย่างทำได้อย่างสะดวกโดยไม่ถูกคลื่นจากทะเลรบกวน และเป็นช่วงที่คนในชุมชนนิยมเก็บหาหอยเสียบ โดยครอบคลุมช่วงเวลาทั้งน้ำเกิด (spring tide) และน้ำตาย (neap tide)

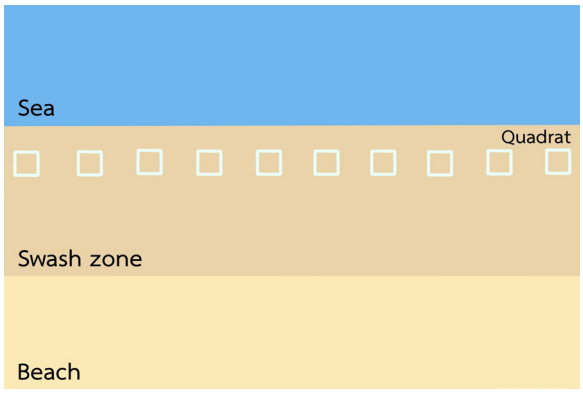


Figure 2 Placing quadrats to survey Wedge clam populations at each beach station

2.2.2 การคำนวณมูลค่าทางเศรษฐกิจของศักยภาพหอยเสียบ

ประชากรหอยเสียบที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดจะถูกนำมาจำแนกเป็น 2 ขนาด และไม่คำนึงถึงชนิดตามเกณฑ์การจำหน่ายหอยเสียบในตลาดท้องถิ่น คือ ขนาดเล็ก มีความยาวเปลือก (shell length) (Figure 3) ตั้งแต่ 1.5 ถึง 2.4 เซนติเมตร และขนาดใหญ่ มีความยาวเปลือกมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำประชากรหอยเสียบแต่ละขนาดมาชั่งน้ำหนักและคำนวณหาน้ำหนักเฉลี่ยของหอยเสียบที่พบในพื้นที่ชายหาด ดังสมการ (2)

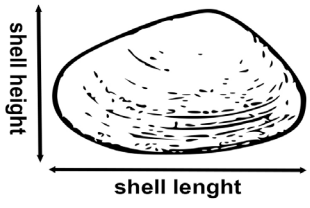


Figure 3 Shell dimensions measuring of this study

หมายเหตุ: ใช้แนวทางวัดขนาดเปลือกหอยตามงานวิจัยของ Smits *et al*. (2020) และ Turra *et al*. (2018)

$$AW_j = \frac{TW_j}{TA} \quad (2)$$

เมื่อ

AWj = น้ำหนักเฉลี่ยของหอยเสียบในพื้นที่ชายหาด (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

TWj = ผลรวมน้ำหนักหอยเสียบแต่ละขนาดในพื้นที่สุ่มตัวอย่างทั้งหมด (กิโลกรัม)

j = ขนาดของหอย ในที่นี้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก และขนาดใหญ่

TA = ผลรวมของขนาดพื้นที่สุ่มตัวอย่างทั้งหมด (ตารางเมตร)

ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดให้ค่าเฉลี่ยดังกล่าวเป็นตัวแทนน้ำหนักของหอยเสียบที่มีอยู่บริเวณชายหาดในแต่ละวัน โดยในรอบ 1 ปีชุมชนสามารถเก็บหาหอยได้ 244 วัน ตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมูลค่าศักยภาพหอยเสียบแต่ละขนาดสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3)

$$PV = \sum[(AW_j \times P_j)] \times 244 \times A \quad (3)$$

เมื่อ

PV = มูลค่าศักยภาพหอยเสียบทั้งหมด (บาท/ตารางเมตร/ปี)

AW_j = ค่าเฉลี่ยน้ำหนักหอยเสียบแต่ละขนาดในพื้นที่ชายหาด (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

P_j = ราคาเฉลี่ยของหอยเสียบที่ซื้อขายในตลาดท้องถิ่น (บาท/กิโลกรัม)

j = ขนาดของหอยเสียบ ในที่นี้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก และขนาดใหญ่

244 = จำนวนวันที่คนในชุมชนสามารถเก็บหาหอยเสียบได้ใน 1 รอบปี (วัน)

A = ขนาดพื้นที่ทั้งหมดตลอดชายหาดม่วงงามที่สามารถเก็บหาหอยเสียบได้ (ตารางเมตร)

ผลการศึกษา

1. ข้อมูลพื้นฐานของผู้เก็บหาหอยเสียบ

ผู้เก็บหาหอยเสียบเป็นอาชีพในชุมชนม่วงงามมีทั้งหมด 17 คน มีอายุระหว่าง 33-72 ปี มีอาชีพหลักแตกต่างกันไป (Table 1) มักเก็บหาหอยเสียบในช่วงบ่ายและใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง แต่ละคนมีจำนวนวันของการเก็บหาหอยเสียบในรอบ 1 ปีไม่เท่ากัน (28-180 วัน) ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ว่างเว้นจากงานหลักหรือปลอดจากภารกิจ แต่ละคนมีวิธีการเก็บหาหอยเสียบตามความถนัดของตน ได้แก่ การคลำหาในทราย (Groping under the sand, 9 คน หรือ 53%) และการสังเกตรูของหอย (Observing the hole, 8 คน หรือ 47%)

2. ปริมาณและมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบเพื่อจำหน่าย

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เก็บหาหอยเสียบเพื่อจำหน่ายทั้งหมดพบว่า ปริมาณหอยที่เก็บหามีทั้งขนาดเล็ก ขนาดใหญ่และผสมกัน แต่ส่วนใหญ่นิยมเก็บหอยขนาดใหญ่ รายได้จากการเก็บหาหอยเสียบ เกิดจากการจำหน่ายหอยเสียบแบบสดที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งราคาจำหน่ายขึ้นอยู่กับขนาดของหอยเป็นหลัก โดยขนาดเล็กมีราคา 60 บาท/กิโลกรัม และขนาดใหญ่มีราคา 90 บาท/กิโลกรัม

สำหรับปริมาณของหอยเสียบที่เก็บหาได้ตลอดปีนั้น จะคำนวณจากปริมาณเฉลี่ยต่อวันที่หาได้ และจำนวนวันในแต่ละเดือนที่หาตลอดรอบ 1 ปี ของแต่ละคน ซึ่งช่วงระหว่างเดือนเมษายน – กันยายน เป็นช่วงที่คลื่นลมในทะเลค่อนข้างสงบ ผู้เก็บหาหอยเสียบทั้ง 17 คน จึงสามารถเก็บหาหอยเสียบได้มีจำนวนวันและปริมาณหอยเสียบที่เก็บหาได้เท่า ๆ กันตลอดช่วงเดือนดังกล่าว และสูงกว่าเดือนอื่น ๆ ในรอบปี (Table 1 และ Figure 4)

รายได้จากการเก็บหาหอยเสียบรวมทั้งหมดจากทั้ง 17 คน มีมูลค่าเท่ากับ 361,750 บาท/ปี เฉลี่ย 21,280 บาท/คน/ปี หรือ 224 บาท/คน/วัน โดยช่วงเดือนเมษายน – กันยายนเป็นช่วงที่รายได้จากการเก็บหาหอยเสียบรวมสูงที่สุดเท่ากับ 42,890 บาท/เดือน เฉลี่ย 2,523 บาท/คน หรือ 225 บาท/คน/วัน ขณะที่มูลค่าต้นทุนการเก็บหาหอยเสียบนั้นเป็นต้นทุนจากค่าแรงในการเก็บหาเป็นหลัก โดยประเมินจากระยะเวลาการเก็บหาของผู้เก็บหาหอยแต่ละรายในแต่ละวัน คูณด้วยจำนวนวันที่ผู้เก็บหาหอยได้เก็บหาต่อปี (Table 1) และคูณด้วยอัตราค่าจ้างขั้นต่ำในปี 2564 ของจังหวัดสงขลาเท่ากับ 40.63 บาท/ชั่วโมง (สำนักแรงงานจังหวัดสงขลา, 2564) โดยต้นทุนการเก็บหาหอยเสียบเพื่อการจำหน่ายมีมูลค่าทั้งหมดเท่ากับ 207,390.64 บาท/ปี เฉลี่ย 12,199.45 บาท/คน/ปี หรือ 128.65 บาท/คน/วัน ซึ่งในระหว่างเดือนเมษายน – กันยายนมีต้นทุนการเก็บหาหอยเสียบสูงที่สุดเท่ากับ 24,456.25 บาท/เดือน เฉลี่ย 1,438.60 บาท/คน/เดือน หรือ 128.04 บาท/คน/วัน

เมื่อนำรายได้และต้นทุนการเก็บหาหอยเสียบของผู้ที่เก็บหาทั้งหมดมาหักลบกัน พบว่า มูลค่าผลประโยชน์สุทธิการเก็บหาหอยเสียบตลอดปีเท่ากับ 154,359.38 บาท/ปี เฉลี่ย 9,079.96 บาท/คน/ปี หรือ 95.57 บาท/คน/วัน โดยระหว่างเดือนเมษายน - กันยายนมีมูลค่าผลประโยชน์สุทธิการเก็บหาหอยเสียบสูงที่สุดเท่ากับ 18,443.75 บาท/เดือน เฉลี่ย 1,084.34 บาท/คน/เดือน หรือ 96.51 บาท/คน/วัน (Figure 4)

3. ปริมาณและมูลค่าศักยภาพการเกิดรายได้จากการเก็บหาหอยเสียบ

ผลการสำรวจประชากรหอยเสียบที่มีความยาวเปลือกมากกว่า 1.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดขั้นต่ำที่คนในชุมชนเก็บหาเพื่อจำหน่ายทั้ง 3 สถานี พบชนิดและปริมาณหอยเสียบ 3 ชนิด (Figure 5) ดังนี้ในช่วงน้ำเกิด (spring tide) จะพบ 2 ชนิด ได้แก่ *D. faba และ D. incarnatus* มีความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่เท่ากับ 11.6±1.85 และ ตามลำดับ ส่วนในช่วงน้ำตาย (neap tide) พบ *D. cuneatus* และ *D. incarnatus* มีความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่ 2.13±0.76 และ 0.67±0.28 ตามลำดับ (Table 2)

เมื่อนำหอยเสียบมาจำแนกขนาดตามรูปแบบการจำหน่ายหอยเสียบของคนในชุมชนโดยไม่คำนึงถึงชนิดของหอย พบว่า บริเวณชายหาดม่วงงามมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักหอยเสียบทุกขนาดเท่ากับ 0.0151 กิโลกรัม/ตารางเมตร/วัน เมื่อคำนวณในภาพรวมของพื้นที่ชายหาดที่มีการเก็บหาหอยเสียบตลอดระยะ 2,900 ตารางเมตร ชายหาดแห่งนี้มีน้ำหนักของหอยเสียบทั้งหมด 10,684.24 กิโลกรัม/ปี หรือ 3.69 กิโลกรัม/ตารางเมตร/ปี คิดเป็นมูลค่าศักยภาพรายได้เท่ากับ 716,421 บาท/ปี หรือ 247.05 บาท/ตารางเมตร/ปี (Table 3)

อภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาปริมาณและมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบบริเวณหาดม่วงงาม ตำบลม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา แสดงถึงคุณค่าของหอยเสียบที่มีต่อชุมชน โดยผลการศึกษามูลค่าผลประโยชน์สุทธิการเก็บหาหอยเสียบ พบว่าสร้างรายได้ต่อผู้เก็บหาหอยเสียบเพื่อการจำหน่ายปีละ 154,359.38 บาท/ปี เฉลี่ย 9,079.96 บาท/คน/ปี หรือ 95.57 บาท/คน/วัน ทั้งนี้รายได้ต่อวันมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ยจากผู้เก็บหาทั้งหมด ซึ่งแต่ละคนมีจำนวนวันเก็บหาหอยเสียบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับทักษะในการเก็บหาหอยและช่วงเวลาที่ว่างเว้นจากอาชีพหลักและภารกิจของแต่ละคน และข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลจากการประมาณการ หากต้องการข้อมูลที่แม่นยำจริง ๆ อาจจะต้องใช้วิธีการสังเกตและจดบันทึกชั่งน้ำหนักในแต่ละวันตลอด 12 เดือน อย่างไรก็ตาม มูลค่าดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าหอยเสียบเป็นแหล่งรายได้เสริมสำหรับคนในชุมชนชายฝั่งเพื่อเป็นการจุนเจือครอบครัวและการดำรงชีวิต และโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีผู้สูงอายุหลังวัยเกษียณที่รายได้ลดลงเกือบกึ่งหนึ่งเข้าร่วมด้วย (8 คน จากจำนวนผู้เก็บหาทั้งหมด 17 คน) ซึ่งการเก็บหาหอยเสียบเป็นกิจกรรมที่ผู้สูงอายุในชุมชนสามารถทำได้โดยไม่ต้องลงทุนและไม่ยากลำบาก ซึ่งนับว่าเป็นการหารายได้เสริมที่ดีอีกทางหนึ่ง

มูลค่าการเก็บหาหอยเสียบจากการศึกษาครั้งนี้ เป็นเพียงมูลค่าบางส่วนจากคนในชุมชนตำบลม่วงงามและเป็นมูลค่าจากการจำหน่ายเท่านั้น โดยยังไม่ได้รวมมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบจากกลุ่มคนอื่น ๆ ได้แก่ ชุมชนใกล้เคียงที่มักมาเก็บหาหอยเสียบในช่วงระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนตุลาคมหลังว่างเว้นจากการทำนา เนื่องจากช่วงที่เก็บข้อมูลผู้คนไม่นิยมเดินทางออกนอกชุมชนของตนเองอันเป็นผลจากการระบาดของโรคไวรัสโคโรนา 2019 (อนุมาน คณะแนม, สัมภาษณ์, 20 เมษายน 2564) หรือคนในชุมชนที่เก็บหาหอยเสียบเพื่อประกอบอาหาร ตลอดจนกลุ่มนักท่องเที่ยวที่เก็บหาหอยเสียบเพื่อเป็นกิจกรรมพักผ่อนขณะมาท่องเที่ยวที่หาดม่วงงามด้วย ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการศึกษาข้อมูลมูลค่าการเก็บหาหอยเสียบที่ครอบคลุมทุกกลุ่มผู้ได้รับประโยชน์

การเปรียบเทียบเพื่อทวนสอบผลการศึกษาด้านมูลค่าในครั้งนี้กับงานวิจัยอื่นยังไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากยังไม่พบงานวิจัยอื่นที่ศึกษามูลค่าการเก็บหาหอยเสียบ แต่จากการสืบค้นทางอินเตอร์เน็ตพบบทความในข่าวที่กล่าวถึงความสำคัญของหอยเสียบในทางเศรษฐกิจ ทั้งในแง่การเป็นแหล่งรายได้และอาหารของชุมชนที่หลากหลาย ทั้งชายฝั่งอ่าวไทยและชายฝั่งอันดามัน ได้แก่ พื้นที่อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา (ไพฑูรย์ ศิริรักษ์, 2554) อำเภอเมืองจังหวัดสงขลา (ผู้จัดการออนไลน์, 2565; หาดใหญ่โฟกัสดอทคอม, 2562) อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี (แนวหน้า, 2563) พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ (บ้านเมือง, 2561; ประดิษฐ์ รอดเกิด, 2562) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหอยเสียบเป็นแหล่งอาหารที่อยู่คู่กับคนไทยทั้งใกล้และไกลชายฝั่งมาอย่างยาวนาน

สำหรับการศึกษามูลค่าศักยภาพ ในส่วนของความแตกต่างระหว่างปริมาณหอยเสียบทั้ง 3 ชนิดที่สำรวจพบในแต่ละครั้งจากแต่ละสถานีนั้น ปัจจุบันยังคงขาดแคลนงานวิจัยที่จะสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวที่ชัดเจน แต่อาจมีความเกี่ยวข้องกับขนาดเม็ดทราย (grain size) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการฝังตัวของหอยแต่ละชนิดในสกุล *Donax* (Nel *et al*., 2001) โดยจากการสังเกตพบว่า ขนาดของเม็ดทรายที่สังเกตได้ในแต่ละครั้งและในแต่ละสถานีระหว่างการสำรวจมีความแตกต่างกัน ซึ่งขนาดเม็ดทรายบนชายหาดมีความแปรผันตลอดเวลาและขึ้นอยู่กับลักษณะสัณฐานของชายหาดในแต่ละบริเวณ (Bujan *et al*., 2019)

นอกจากนี้ มีความเป็นไปได้ที่ประชากรหอยเสียบบนหาดม่วงงามมีความเชื่อมโยงกับประชากรหอยเสียบบริเวณจังหวัดสงขลาและนครศรีธรรมราช ในแง่ของการเกิดใหม่ทดแทนประชากรเดิมซึ่งกันและกันของประชากรหอยเสียบบริเวณอ่าวไทยตอนล่าง เนื่องจากกระแสน้ำในอ่าวไทยมีการพัดพาตัวอ่อนกระจายไปทั่ว (Wangkulangkul *et al*., 2021) การลดลงของประชากรหอยเสียบในหาดใดหาดหนึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประชากรหอยเสียบในหาดอื่น ๆ ได้

Table 1 Descriptive data of the respondents who harvested wedge clams.

Number	Age (years)	Occupation	Harvesting time	Harvesting hours (hours/day)	Number of Days to Harvest (days/year)	Harvesting method	Harvested quantity of wedge clams (kg/day)			
							Small	Large	Mixed	Total
1	64	Retirement	Afternoon	3	119	Groping under the sand			2	2
2	65	Retirement	Afternoon	3	119	Groping under the sand			2	2
3	49	Cook	Afternoon	3	180	Groping under the sand		3		3
4	60	Farmer	Morning	3	115	Observing the hole			4	4
5	65	Traditional doctor	Morning	3	118	Observing the hole	1	2		3
6	70	Merchant	Afternoon	1	45	Groping under the sand	0.2	0.3		0.5
7	72	Famer	Morning	2	63	Groping under the sand	0.5	1		1.5
8	61	Freelance	Afternoon	3	35	Groping under the sand		3		3
9	35	Worker	Afternoon	3	32	Observing the hole		2		2
10	56	Farmer	Afternoon	3	85	Groping under the sand		1.5		1.5
11	42	Farmer	Afternoon	3	130	Groping under the sand		2		2
12	40	Farmer	Afternoon	3	165	Observing the hole		5		5
13	53	Freelance	All day	8	90	Observing the hole		5		5
14	35	Worker	Afternoon	2	28	Observing the hole		2		2
15	33	Merchant	Afternoon	3	90	Observing the hole		2		2
16	34	Merchant	Afternoon	3	90	Observing the hole		1.5		1.5
17	67	Farmer	Morning	3	108	Groping under the sand		2		2

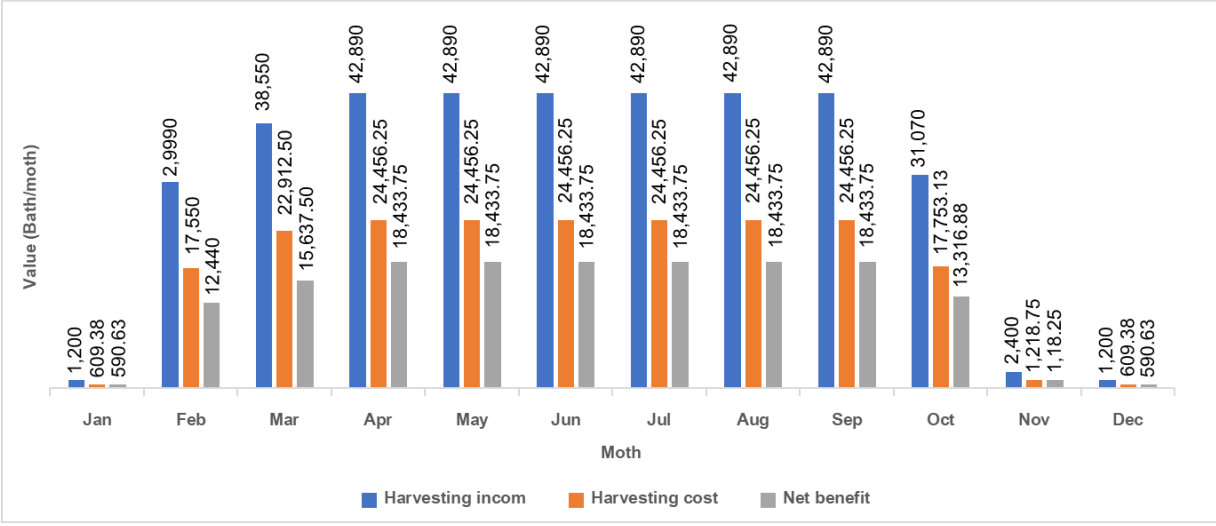


Figure 4 Harvesting income, harvesting cost and net benefit from the study site in one year (n = 17) (Bath/month)

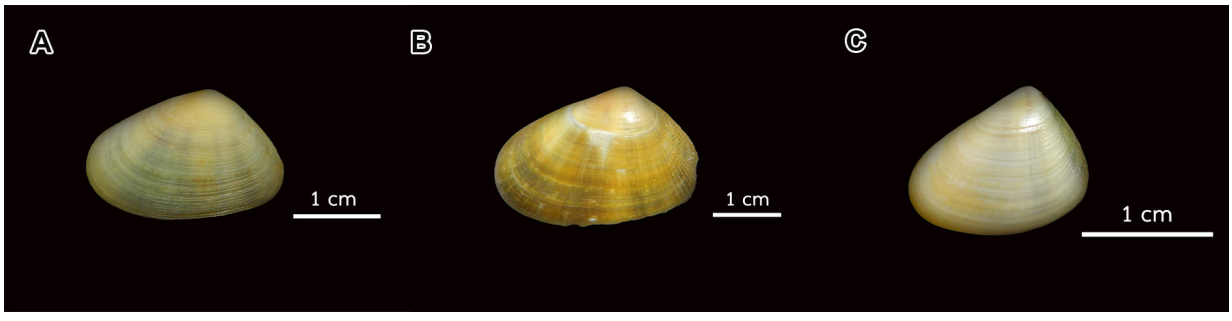


Figure 5 The species of Wedge clams found in the study area were A. *Donax faba*, B. *D. cuneatus*, and C. *D. incarnatus*

Table 2 Populations of Wedge clams with shell length greater than 1.5 cm surveyed at each site on Muang Ngam Beach area.

Time	Site	Average density (ind/m^2)		
		D. faba	*D. cuneatus*	*D. incarnatus*
1 (Spring tide)	1	7.2±2.13	-	4±1.58
	2	14±3.78	-	1.6±0.88
	3	13.6±3.33	-	12.4±1.93
	Average	11.6±1.85		6±1.21
2 (Neap tide)	1	-	-	4±0.53
	2	-	6.4±1.26	-
	3	-	-	-
	Average		2.13±0.76	0.67±0.28

Table 3 The potential value of wedge clams on Muang Ngam beach.

Size	Price (Bath/kg)	Daily average weight (kg/m^2/day)	Annual average weight		Value of potential harvest	
			In 1 m^2 (kg/ m^2/year)	*Total area (kg/year)	In 1 m^2 (Bath/ m^2/year)	*Total area (Bath/year)
Small	60	0.0115	2.82	8,172.02	169.08	490,321.20
Large	90	0.0036	0.87	2,512.22	77.97	226,099.43
Total		0.0151	3.69	10,684.24	247.05	716,421.00

*The study area was 2,900 m long and one meter wide

สำหรับมูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบ ที่มีค่าเท่ากับ 716,421 บาท/ปี หรือ 247.05 บาท/ตารางเมตร/ปี ในขณะที่มูลค่าการเก็บหาหอยเสียบในปัจจุบันมีมูลค่าเพียง 361,750 บาท/ปี หรือ 125 บาท/ตารางเมตร/ปี แสดงให้เห็นว่าการเก็บหาหอยเสียบยังคงไม่เกินความสามารถในการรองรับการใช้ทรัพยากร (carrying capacity) และแสดงให้เห็นว่าระบบนิเวศของหาดม่วงงามยังคงมีความสมบูรณ์ที่เอื้อให้ประชากรหอยเสียบมีมากพอต่อการสร้างประชากรใหม่มาแทนที่ประชากรเดิมได้ (Tinker *et al*., 2021)

ผลการศึกษาในครั้งนี้สะท้อนให้เห็นว่า หอยเสียบมีความสำคัญต่อคนในชุมชนม่วงงาม ไม่เพียงในด้านการเป็นแหล่งรายได้ของผู้เก็บหา แต่ยังเป็นแหล่งอาหาร เป็นกิจกรรมสำหรับผู้สูงวัย และเป็นกิจกรรมนันทนาการแก่คนในชุมชนและผู้ที่มาท่องเที่ยวบริเวณหาดม่วงงามด้วย อย่างไรก็ตาม ข้อมูลมูลค่าของผลประโยชน์ด้านต่าง ๆ ของหอยเสียบยังค่อนข้างขาดแคลน จึงเป็นผลให้ในการดำเนินกิจกรรมบริหารจัดการหาดแห่งนี้ เช่น การสร้างกำแพงกันคลื่น ไม่ได้คำนึงถึงความสำคัญของหอยเสียบ

ดังนั้น ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ จึงมีส่วนช่วยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญทางเศรษฐกิจของหอยเสียบที่มีต่อคนในชุมชน และยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาทางด้านชีววิทยาและนิเวศวิทยาของหอยเสียบ เพื่อเพิ่มความเข้าใจถึงลักษณะการกระจายตัว ความสัมพันธ์ระหว่างหอยเสียบและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น การเป็นอาหารให้กับสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบนิเวศชายหาด (Carstensen *et al*., 2009) เป็นต้น รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมของหอยเสียบ เช่น การดักจับอินทรีย์วัตถุ แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ (Takar *et al*., 2021) ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของน้ำบริเวณหาด เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อนำผลการศึกษาไปใช้ในการจัดการชายหาดที่เหมาะสม อันนำไปสู่การอนุรักษ์หอยเสียบและสิ่งมีชีวิตอื่น เพื่อให้การใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติมีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บริเวณชายหาดม่วงงาม อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา มีผู้เก็บหาหอยเสียบเพื่อการจำหน่าย 17 คน หอยเสียบที่เก็บหาได้มี 3 ชนิด มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักหอยเสียบทุกขนาดเท่ากับ 0.0151 กิโลกรัม/ตารางเมตร/วัน นิยมจำหน่ายหอยเสียบ 2 ขนาด คือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ มีราคาเฉลี่ย 60 และ 90 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ มูลค่าผลประโยชน์สุทธิจากการเก็บหาหอยเสียบเพื่อการจำหน่ายทั้งหมดในปี 2564 เท่ากับ 154,359.38 บาท เฉลี่ย 9,079.96 บาท/คน/ปี หรือ 95.57 บาท/คน/วัน ขณะที่มูลค่าศักยภาพการเก็บหาหอยเสียบในพื้นที่ชายหาดทั้งหมดเท่ากับ 716,421 บาท หรือ 247.05 บาท/ตารางเมตร/ปี ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นความสำคัญของหอยเสียบที่มีต่อชุมชนม่วงงามและชุมชนชายฝั่งอื่น ๆ ที่มีหอยเสียบอาศัยอยู่บริเวณชายหาดในชุมชน ดังนั้น หอยเสียบจึงควรค่าแก่การอนุรักษ์ไว้ให้เกิดการใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ในส่วนของการศึกษาปริมาณหอยเสียบเพื่อประเมินมูลค่าศักยภาพควรมีการสำรวจปริมาณหอยเสียบให้ครอบคลุมตลอดปี นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชีววิทยาของหอยเสียบ เพื่อเพิ่มความเข้าใจถึงลักษณะการกระจายตัวของหอยเสียบแต่ละชนิดตลอดจนควรมีการศึกษาเกี่ยวกับบทบาททางสิ่งแวดล้อมและทางระบบนิเวศของหอยเสียบและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ บนชายหาด รวมถึงควรมีการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมในการนำสิ่งมีชีวิตเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยไม่รบกวนสมดุลธรรมชาติ เช่น ศึกษาขนาดที่เหมาะสมของหอยที่ควรเก็บที่ ฤดูกาลที่เหมาะสมสำหรับเก็บหาที่ไม่ใช่ฤดูกาลสืบพันธุ์ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อนำผลการศึกษาไปใช้ในการอนุรักษ์หอยเสียบและสิ่งมีชีวิตอื่นบนหาดทราย ซึ่งจะนำไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรและการใช้ประโยชน์จากหอยเสียบอย่างยั่งยืนและไม่ทำลายความสัมพันธ์ที่สำคัญในระบบนิเวศ

เอกสารอ้างอิง

เกื้อ ฤทธิบูรณ์, สุภาพร ฝั่งชลจิตต์, พิมลรัตน์ ทองโรย, เชาวพจน์ ชววงศ์ษา, และ สมศักดิ์ บัวทิพย์. (2562). นิเวศวิทยาบางประการของหอยเสียบ (*Donax faba* Gmelin, 1791) บริเวณหาดบางหลิง อำเภอเทพา จังหวัดสงขลา. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, *24*(1), 395–414.

คณะกรรมการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งจังหวัดสงขลา. (2560). *รายงานสถานการณ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง และการกัดเซาะชายฝั่งจังหวัดสงขลา*.

ณัฐฌาชิตา ชูเกิด, ศศิธร บุญเดช, สุธินี หีมย, และ นุชจรินทร์ เพชรเกลี้ยง. (2564). ความแปรผันทางสัณฐานวิทยาของหอยเสียบ (*Donax faba* Gmelin, 1791) และปัจจัยสิ่งแวดล้อมบางประการบริเวณหาดบางหอยและหาดบางเรือนาค จังหวัดสงขลา. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, *49*(4), 351–361.

แนวหน้า. (2563, 28 กรกฎาคม). *ชาวบ้านหา 'หอยเสียบ' หาดดงตาลพัทยามาปรุงเมนูเด็ด 'หอยเสียบผัดน้ำพริกเผา'*. https://www.naewna.com/likesara/508044

บ้านเมือง. (2561, 25 สิงหาคม). *“หอยเสียบ” เมนูหรอย ปีละครั้ง ต้องหน้ามรสุมเท่านั้นจึงหากินได้*. https://www.banmuang.co.th/news/region/122927

ประดิษฐ์ รอดเกิด. (2562, 3 สิงหาคม). *หอยเสียบโผล่ชายหาด ชาวบ้านขุดขาย หารายได้*. 77ข่าวเด็ด. https://www.77kaoded. com/news/pradit/708924

ผู้จัดการออนไลน์. (2565, 29 กันยายน). *หาหอยเสียบริมทะเล*. https://mgronline.com/south/detail/9650000093642

ไพฑูรย์ ศิริรักษ์. (2554). *หอยเสียบ หอยสองฝา หรือหอยทราย*. GotoKnow. https://www.gotoknow.org/posts/432300

สาวิกา กัลปพฤกษ์, และ สิทธิ กุหลาบทอง. (2556). การประยุกต์ใช้หอยสองฝาในการจัดการคุณภาพน้ำ. *Veridian E-Journal, Silpakorn University*, *6*(3), 846–859.

สำนักแรงงานจังหวัดสงขลา. (2564). *ค่าแรงขั้นต่ำจังหวัดสงขลา*. https://songkhla.mol.go.th/อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ

เสถียรพงษ์ ขาวหิต, และ เกษม จันทร์แก้ว. (2559). อิทธิพลของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดต่อมูลค่าสัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ที่สำคัญทางเศรษฐกิจบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย: โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่*, *8*(4), 84–96.

หาดใหญ่โฟกัสดอทคอม. (2562, 19 พฤษภาคม). *ชาวสงขลางมหอยเสียบ อาชีพเสริมสร้างรายได้หลักพัน*. https://www.hatyaifocus.com/ข่าว/8813-ข่าวเศรษฐกิจและการเงิน-สงขลา%2B%7C%2Bชาวสงขลา%2Bงมหอยเสียบ%2Bอาชีพเสริมสร้างรายได้หลักพัน

Basco, D. R. (2006). Seawall impacts on adjacent beaches: Separating fact from fiction. *Journal of Coastal Research*, *39*, 741–744.

Bujan, N., Cox, R., & Masselink, G. (2019). From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. *Marine Geology*, *417*, 1–17.

Carstensen, D., Laudien, J., Leese, F., Arntz, W., & Held, C. (2009). Genetic variability, shell and sperm morphology suggest that the surf clams *Donax marincovichi* and *D. obesulus* are one species. *Journal of Molluscan Studies*, *75*(4), 381–390. https://doi.org/10.1093/mollus/eyp036

DeLancey, L. (1999). *Coquina clam*. South Carolina Department of Natural Resources. http://www.dnr.sc.gov/cwcs/pdf/Coquinaclam.pdf

Manatrinon, S., Thonglor, O.-U., & Boonyapakdee, A. (2012). Genetic and morphological variation in three populations of *Donax* spp. in the Gulf of Thailand. *Thai Journal of Genetics*, *5*(1), 79–88.

Nel, R., McLachlan, A., & Winter, D. P. E. (2001). The effect of grain size on the burrowing of two *Donax* species. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *265*(2), 219–238.

Özden, Ö., Erkan, N., & Ulusoy, Ş. (2009). Seasonal variations in the macronutrient mineral and proximate composition of two clams (*Chamelea gallina* and *Donax trunculus*). *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *60*(5), 402–412. https://doi.org/10.1080/09637480701772945

Signorelli, J. H., & Printrakoon, C. (2020). The family Donacidae (Bivalvia: Tellinoidea) in Thai waters. *Molluscan Research*, *3*.

Smits, M., Enez, F., Ferraresso, S., Rovere, G. D., Vetois, E., Auvray, J. F., Genestout, L., Mahla, R., Arcangeli, G., Paillard, C., Haffray, P., & Bargelloni, L. (2020). Potential for genetic improvement of resistance to *Perkinsus olseni* in the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, using DNA parentage assignment and mass spawning. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*, 1–14.

Supmee, V., Songrak, A., Suppapan, J., & Sangthong, P. (2021). Population genetic structure of the wedge clam (*Donax scortum*) along the Andaman Sea coast of Thailand. *Journal of Fisheries and Environment*, *45*(1), 85–97.

Takar, S., Jawahar, P., Gurjar, U. R., Kingston, S. D., Neethiselvan, N., Pereira, J. J., & Jagadis, I. (2021). Food and feeding habits of wedge clam (*Donax cuneatus*) off Thoothukudi, Gulf of Mannar, India. *Indian Journal of Animal Research*, *57*(3), 328–333.

Tantikamton, K., Rodpai, J., Srinakorn, P., & Jitpukdee, S. (2017). Species diversity and spatial distribution of macroinvertebrates on the intertidal zone of Rajamangala Beach, Trang Province, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*, *15*(1), 30–40.

Tenjing, S. Y. (2017). Biometric relationships of the edible wedge clam, *Donax faba* (Gmelin, 1791) of two populations from Panambur (polluted area) and Padukere (unpolluted area) with reference to environmental variables (India). *Vie et Milieu*, *67*(3–4), 179–192.

Tinker, M. T., Yee, J. L., Laidre, K. L., Hatfield, B. B., Harris, M. D., Tomoleoni, J. A., Bell, T. W., Saarman, E., Carswell, L. P., & Miles, A. K. (2021). Habitat features predict carrying capacity of a recovering marine carnivore. *Journal of Wildlife Management*, *85*(2), 303–323.

Turra, A., Corte, G. N., Amaral, A. C. Z., Yokoyama, L. Q., & Denadai, M. R. (2018). Non-linear curve adjustments widen biological interpretation of relative growth analyses of the clam *Tivela mactroides* (Bivalvia, Veneridae). *PeerJ*, *6*, Article e5070.

Varadharajan, D., Soundarapandian, P., Gunalan, B., & Babu, R. (2009). Seasonal abundance of macro benthic composition and diversity along the south east coast of India. *European Journal of Applied Sciences*, *2*(1), 1–5.

Wangkulangkul, K., Khantasimachalerm, N., Kaewutai, K., & Choosun, T. (2021). *Distribution of wedge clams Donax spp. on sandy beaches of Thailand* [Unpublished manuscript].

Yucharoen, M., Khantasimachalerm, N., Punritdum, N., Thawaii, S., Kaewutai, K., Choosun, T., & Wangkulangkul, K. (2020). Does coastal erosion influence to dominant macrobenthic invertebrates on Sonkhla sandy beaches? *Proceedings of The Science Society of Thailand Under the Patronage of His Majesty the King, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University*, 721–727.

ผลของสารสกัดน้ำจากใบหูกวางต่อเชื้อ *Staphylococcus aureus* ภายใต้ความแตกต่างของความเข้มข้นและระยะเวลาการสัมผัส

Effects of Indian almond ieaf aqueous extract on *Staphylococcus aureus* in relation to concentration and exposure time

จิราภา รุ่งเรืองสาคร[1], กัญจน์ กาญจนเจริญ[1], ณัฐนรี แก้วศิริ[2] และสิทธิชน รัตนจันทร์[3*]

Jirapa Rungreangsakhon[1], Gun Kanchanacharoen[1], Natnaree Kaewsiri[2] and Sitthichon Rattanachan[3*]

Received: 30 January 2025 ; **Revised**: 20 June 2025 ; **Accepted**: 9 July 2025

บทคัดย่อ

เชื้อ *Staphylococcus aureus* เป็นเชื้อก่อโรคที่ผิวหนังในทั้งสัตว์เลี้ยงและมนุษย์ที่มีแนวโน้มการดื้อต่อยาปฏิชีวนะของเชื้อแบคทีเรียที่สูงขึ้นจึงทำให้สารต้านแบคทีเรียจากธรรมชาติได้รับความสนใจ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของและระยะเวลาของสารที่ได้จากใบหูกวาง (*Terminalia catappa* Linn.) ในการฆ่าเชื้อ *S. aureus* โดยมีวิธีการทดลอง ได้แก่ การเตรียมสารสกัดน้ำจากใบหูกวาง โดยวิธีการต้มและแช่ การหาความเข้มข้นของแทนนินจากสารสกัดแช่หมักและระยะเวลาที่ออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อเชื้อแบคทีเรีย จากการศึกษาพบว่าสารสกัดน้ำใบหูกวางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการต้มและแช่มีความเข้มข้นของแทนนินทั้งหมดเท่ากับ 0.76 มก./มล. และพบว่ามีค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี broth macrodilution assay อยู่ที่ 0.35 ถึง 0.4 มก./มล. และจากการศึกษาระยะเวลาในการออกฤทธิ์ของสารสกัดน้ำใบหูกวางต่อการลดลงของจำนวนแบคทีเรีย พบว่าที่ความเข้มข้นของแทนนินในสารสกัดน้ำใบหูกวาง 0.35 มก./มล. นั้นทำให้จำนวนโคโลนีของ *S. aureus* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก 115 ที่ 2 ชั่วโมง เหลือ 0 ที่ 24 ชั่วโมง (r_s = -1.000, p-value < 0.001) และที่ความเข้มข้นของแทนนินในสารสกัดน้ำใบหูกวาง 0.4 มก./มล. ให้ผลในการกำจัดแบคทีเรียอย่างรวดเร็ว โดยจำนวนโคโลนีแบคทีเรียลดลงอย่างมีนัยสำคัญเหลือ 0 ที่ 8 ชั่วโมง (r_s = -0.975, p-value = 0.02) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าสารสกัดน้ำใบหูกวางอาจเป็นทางเลือกจากธรรมชาติที่ช่วยลดการใช้ยาปฏิชีวนะในการรักษาการติดเชื้อ *S. aureus* ได้

คำสำคัญ: ใบหูกวาง, สารสกัดน้ำ, ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย, สแตปฟิโลคอคคัส ออเรียส

Abstract

Staphylococcus aureus is a pathogenic bacterium that causes skin infections in both pets and humans with the increasing trend of bacterial resistance to antibiotics, prompting interest in alternative antibacterial agents from natural sources. Therefore, this study aims to the efficacy of aqueous extract from Indian almond (*Terminalia catappa* Linn.) leaves, focusing on determining the minimum bactericidal concentration (MBC) and the time required for effective killing *S. aureus*. The experiment was conducted by preparing an aqueous extract of Indian almond leaves through boiling, followed by extended immersion for 7 days. The MBC and Time-dependent killing was performed by macrodilution method. The results show that the ferment extract of Indian almond leaf extract contained 0.76 mg/ml of tannin. The MBC of ferment extract against *S. aureus* was between 0.35 to 0.4 mg/ml. In addition, time-killing assay

[1] นักศึกษาสัตวแพทย์ชั้นปีที่ 6 คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[2] คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[3] โปรแกรมวิทยาศาสตร์สุขภาพสัตว์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

[1] 6th year veterinary student, Faculty of Veterinary Medicine, Mahanakorn University of Technology

[2] Faculty of Veterinary Medicine, Mahanakorn University of Technology

[3] Animal Health Science Program, Faculty of Science and Technology, Chiang Rai Rajabhat University

* Corresponding author; Sitthichon Rattanachan; E-mail: sitthichon.rat@crru.ac.th

demonstrated a concentration and time-dependent bactericidal effect. At 0.35 mg/ml of aqueous extract, colony counts of *S. aureus* statistically significantly decreased from 115 at 2 hours to 0 at 24 hours (r_s = -1.000, p-value < 0.001). At 0.4 mg/ml, bacterial colony elimination occurred rapidly, with colony counts reduced significantly to 0 at 8 hours (r_s = -0.975, *p*-value = 0.02). These findings suggest that the aqueous Indian almond leaf extract may serve as a natural alternative to reduce antibiotic use against *S. aureus* infection.

Keywords: Indian almond leaf, *Staphylococcus aureus*, aqueous extract, tannin, antibacterial activity

Introduction

Pyoderma is a bacterial infectious skin disease characterized by various clinical presentations of skin such as erythema, alopecia, and itching with macules, papules, or pustules. The causative pathogen of pyoderma in animals is bacteria of the genus *Staphylococcus*, gram-positive bacteria, that live on the skin as normal flora, which infection typically secondary to skin damage (Heinrich *et al*., 2019). The infection may persist or recurrently infect due to contributing factors that promote the overgrowing and spreading of bacteria among animals including improper hygienic and veterinary care, stray dogs and cats, housing conditions, and pet and owner contact (Moon *et al*., 2022). These skin problems in animals commonly end with antibiotic treatment by veterinary practitioners. However, inappropriate treatment of pyoderma in animals with a lack of diagnostic data or improper selection and dose of antibiotics might lead to antimicrobial-resistant (AMR) bacteria (Malik *et al*., 2005), which commonly emerge among animals and humans. Moreover, bacterial resistance can be worsened in human and animal health due to multiple drug-resistant strains of bacteria. The methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), for instance, resists not only methicillin but also antibiotics such as aminoglycosides, macrolides, tetracycline, chloramphenicol, and lacosamide (Nikaido, 2009). Hence, tackling this issue requires coordinated efforts in surveillance, antibiotic stewardship, and research into alternative treatments such as medicinal plants.

In this study, we have investigated the antibacterial effect of the leaf from the Indian almond tree (*Terminalia catappa* Linn.), which is commonly found in Thailand. This plant has been used as traditional medicine in aquatic animals due to its benefits for wound healing and antimicrobial properties (Malawa *et al*., 2022) against *S. epidermidis*, *S. aureus, B. cereus*, *B. subtilis*, and *P. aeruginosa* (Chansue & Assawawongkasem, 2008). These therapeutic effects including antimicrobial activity are related to some chemical constituents of Indian almond leaf such as tannins, flavonoids, isovitexin, vitexin, isoorientin, rutin, and triterpenoids (Chansue & Assawawongkasem, 2008; Anand *et al*., 2015).

Although its antimicrobial potential is recognized, limited data exist on its bactericidal activity, specifically regarding the minimum bactericidal concentration (MBC) and the time required to achieve bacterial elimination. Therefore, this study aims to investigate the minimum concentration of aqueous Indian almond leaf extract against *S. aureus* and the suitable time for bacterial inhibition.

Materials and Methods

1. Preparation of aqueous extract from Indian almond leave

An aqueous extract of Indian almond leaves (*Terminalia catappa*) was prepared based on the methods of Chansue and Assawawongkasem (2008) and Muangthai *et al*. (2015) with modifications. Dried reddish-brown leaves, purchased from Thailand, were used for the preparation. A 32 g sample of the leaves was further dried at 60°C for 30 minutes and subsequently ground into a coarse powder. The aqueous extraction was performed by adding the ground Indian almond leaves to 250 ml of distilled water, followed by boiling at 100°C for 5 minutes. The resulting extract was then allowed to undergo an extended immersion period, stored in the dark at room temperature for 7 days, with daily pH monitoring and recording. No intentional microbial inoculum was added during this period. Finally, the mixture was passed through a stainless steel sieve to remove coarse particulate

matter. The resulting liquid was then sterile-filtered using a 0.22 µm rapid flow bottle top filter (Nalgene™, Thermo Scientific). The sterile aqueous extract was collected, aliquoted, and stored at -20°C until further use.

2. Quantitative estimation of total tannin

The total tannin content in the Indian almond leaf aqueous extract was determined using the Folin-Ciocalteu colorimetric method, following the protocols of Muangthai *et al*. (2015) and Kahlaoui *et al.* (2019) with slight modifications. A set of tannic acid standards (Gallotannin, Himedia™) was prepared in distilled water at concentrations of 0, 2, 4, 6, 8, and 10 mg/ml. The aqueous extract sample was prepared for analysis by performing undiluted and a two-fold water-diluted extract samples. For the assay, 100 µl of each standard concentration and the diluted aqueous extract were placed into separate test tubes. To each tube, 500 µl of 10% Folin-Ciocalteu reagent (Loba Chemie, India) was added, followed by 400 µl of 7.5% sodium carbonate. The mixtures were immediately vortexed and incubated at room temperature in the dark for 30 minutes to allow for color development. The absorbance of each standard and sample was then measured at 700 nm using a spectrophotometer, with the 0 mg/ml standard serving as the blank.

To calculate the concentration, a linear regression curve was established from the tannic acid standards (Figure 1). The absorbance of both the undiluted and diluted samples was used to determine their concentrations from this equation. The result for the diluted sample was multiplied by the dilution factor of 2. The final tannin content was taken from the sample whose absorbance fell within the linear range of the assay and expressed as mg/ml of tannic acid equivalent.

3. Minimum bactericidal concentration (MBC) of Indian almond leaf aqueous extract against *S. aureus*

The *S. aureus* (TSTR 1840) sample provided by the Immunology Lab, Faculty of Veterinary Medicine, Mahanakorn University of Technology, was used to evaluate the bactericidal effect of the Indian almond leaf ferment extract using the broth dilution technique. To ensure specificity, bacterial samples were selectively cultured on mannitol salt agar to confirm Staphylococcal presence, followed by isolation of a single colony and culturing in nutrient broth at 37°C for 48 hours. The bacterial density was quantified as colony-forming units per milliliter (CFU/ml) prior to testing.

For the experiment, 100 µl of fresh bacterial culture at 1.14×10^9 CFU/ml was added to each 1.5 ml microcentrifuge tube containing Mueller-Hinton broth, alongside 10 µg of amoxicillin (positive control, Andrews, 2004) and various concentrations of estimated tannin equivalents from the Indian almond leaf ferment extract (0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, and 0.4 mg/ml). After incubation at 37°C for 24 hours, treated bacterial samples were subjected to serial dilutions (10^1, 10^2, 10^4, and 10^6) in Mueller-Hinton agar and cultured for an additional 24 hours. The recovered bacterial colonies were counted and quantified as CFU/ml, allowing for assessment of the minimum bactericidal concentration.

4. Time-dependent bactericidal effect of Indian almond aqueous extract against *S. aureus*

The time-dependent bactericidal activity of Indian almond aqueous extract against *S. aureus* was evaluated using two selected minimum bactericidal concentrations determined in the previous experiment. A total of 100 µl of freshly prepared *S. aureus* suspension (1.14×10^9 CFU/ml) was added into individual sterile microcentrifuge tubes containing either 10 µg of amoxicillin (positive control) or the two tested MBC concentrations of the aqueous extract.

All treated samples were incubated at 37°C and sampled at specific time intervals: 0, 2, 4, 6, 8, and 24 hours. At each time point, 20 µl of the bacterial suspension from each treatment group was collected and serially diluted with sterile water to 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-4}, and 10^{-6}. Aliquots from each dilution were plated onto mannitol salt agar and incubated for 48 hours at 37°C.

After incubation, bacterial colonies were counted, and viable bacterial counts were expressed as colony-forming units per milliliter (CFU/ml). The percentage of bacterial reduction at each time point was calculated

based on the initial CFU/ml, following the method described by Balouiri *et al*. (2015), to assess the time-dependent bactericidal effect of the extract.

5. Data collection and analysis

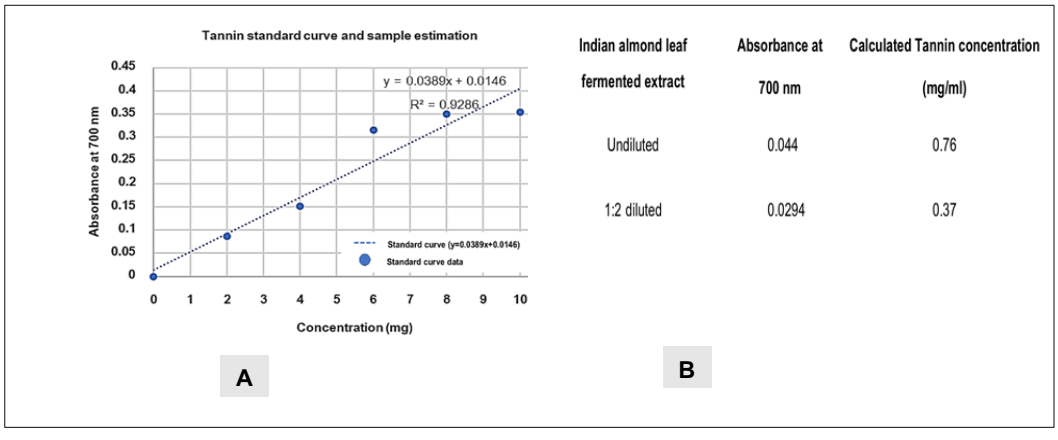
In this study, the concentration of total tannin in Indian almond leaf aqueous extract was presented as mg/ml. The number of *S. aureus* observed during the experiments was recorded as bacterial colonies and CFU/ml. Then, the relationship between the exposure time and the number of bacterial colonies was statistically determined by Spearman correlation using IBM SPSS statistics version 23. The statistical significance was set at a confidence level of 95% ($p < 0.05$).

Results and discussion

1. Characteristics of aqueous extract from Indian almond leave and total tannin content

The Indian almond leaf aqueous extract was prepared by hot water extraction using 32 g of homogenized reddish-brown dried leaves in 250 ml of distilled water. The mixture was allowed to stand in dark conditions at room temperature for 7 days, yielding a brownish, water-soluble extract with an acidic final pH of 3.65. A gradual decrease in pH was observed over the 7-day extraction period, with pH values recorded at 3.98, 3.77, 3.69, 3.73, 3.64, 3.60, 3.61, and 3.65 from day 0 to day 7, respectively. This acidification may be attributed to the release of phenolic compounds and hydrolyzable tannins during extended aqueous extraction. Similar observations were reported by Chansue and Assawawongkasem (2008), where the application of Indian almond leaf extract at increasing concentrations (0–10 mg/ml) decreased the pH of aquaria water from 7.60 ± 0.14 to 6.09 ± 0.16. The acidity of the extract is likely due to the presence of hydrolyzable tannins, which are known to contain esters of phenolic acids such as gallic acid and ellagic acid (Bule *et al*., 2020). During hot water extraction, hydrolysis of tannins that are bound to plant cell wall components such as cellulose can be enhanced, resulting in a greater release of free phenolic acids (Das *et al*., 2020; Bolling, 2017).

The total tannin content of the Indian almond leaf aqueous extract was estimated at 0.76 mg/ml (Figure 1B), based on a standard gallotannin curve (2–10 mg/ml) and absorbance at 700 nm (Figure 1A). Although a high leaf-to-water ratio was used (32 g in 250 ml; 12.8% w/v), the yield was lower than expected. This may be due to differences in leaf color, maturity, and extraction efficiency (Muangthai *et al*., 2015; Mueller-Harvey, 2001). Indian almond leaves contain hydrolyzable tannins such as gallotannins, which can release phenolic acids under heat and polar solvent conditions (Bule *et al*., 2020; Desam & Al-Rajab, 2022; Arapitsas, 2012). These factors, along with natural variability, may explain the moderate tannin concentration observed. Tannin content was measured once per sample; future studies should include replicates to enhance accuracy.



Indian almond leaf fermented extract	Absorbance at 700 nm	Calculated Tannin concentration (mg/ml)
Undiluted	0.044	0.76
1:2 diluted	0.0294	0.37

Figure 1 Panel A shows the tannin standard curve with the regression equation and R^2 value for concentration estimation. Panel B presents OD measurements for undiluted and two-folded diluted Indian almond leaf aqueous extract and estimated tannin concentration.

2. Minimum bactericidal concentration (MBC) of Indian almond leaf aqueous extract against *S. aureus*

The bactericidal activity of Indian almond leaf aqueous extract against *Staphylococcus aureus* was evaluated using the broth dilution technique followed by bacterial recovery on Mueller-Hinton agar. Post-treatment bacterial suspensions were serially diluted (10^{-1}, 10^{-2} 10^{-4}, and 10^{-6}) and plated to determine viable colony counts. At a 10^{-4} dilution, over 300 colonies were observed in the group treated with 0.1 mg/ml of the crude extract, indicating limited bactericidal effect. At a 10^{-4} dilution, over 300 colonies were observed, which exceeds the reliable counting range and is considered too numerous to count (TNTC) due to potential overlap and miscounting (Madigan *et al*., 2019). In contrast, lower concentrations of the extract (0.15 to 0.4 mg/ml) showed a dose-dependent reduction in bacterial count: 260 colonies (2.60×10^6 CFU/ml), 245 colonies (2.45×10^6 CFU/ml), 38 colonies (3.80×10^5 CFU/ml), 185 colonies (1.85×10^6 CFU/ml), 51 colonies (5.10×10^5 CFU/ml), and 31 colonies (3.10×10^5 CFU/ml), respectively. As a positive control, amoxicillin-treated samples yielded 15 colonies at 10^{-6} dilution (1.50×10^8 CFU/ml). Notably, no bacterial colonies were recovered from the 10^{-6} dilution in samples treated with Indian almond leaf aqueous, suggesting that bactericidal activity occurred at this concentration (Table 1).

Table 1 Minimum bactericidal concentration (MBC) of 0.1–0.4 mg/ml tannin from Indian almond leaf aqueous extract against *S. aureus*

Indian almond leaf aqueous extract (mg/ml)	Dilution 10^{-4}		Dilution 10^{-6}	
	Colony	CFU/ml	Colony	CFU/ml
0.10	>300	-	0	-
0.15	260	2.60×10^6	0	-
0.20	245	2.45×10^6	0	-
0.25	38	3.80×10^5	0	-
0.30	185	1.85×10^6	0	-
0.35	51	5.10×10^5	0	-
0.40	31	3.10×10^5	3	$3x10^6$
Amoxicillin 10 µg (Positive control)	>300	-	15	1.50×10^8

Note: > 300 bacterial colonies considered too numerous to count (TNTC) (Madigan *et al*., 2019).

Based on the results, the minimum bactericidal concentration (MBC) of Indian almond leaf aqueous extract against *S. aureus* was identified at 0.35–0.4 mg/ml, at which no viable colonies were recovered. This aligns with previous reports on tannins' antibacterial activity. Akiyama et al. (2001) found that tannic acid at 280 mg/L inhibited 14 *S. aureus* strains, and full bactericidal activity was observed above 4,500 mg/L. Similarly, Dong *et al*. (2017) demonstrated that tannic acid at 40–160 µg/ml (mean 80 µg/ml) inhibited both MSSA and MRSA. Regarding *T. catappa*, Thansuwan *et al*. (2019) reported that aqueous extract at 32.25 mg/ml produced a 4.33 mm inhibition zone, while 70% and 97% ethanol extracts at 32.25 and 15.63 mg/ml yielded 3.33 mm and 6.67 mm zones, respectively. These results suggest concentration-dependent bactericidal effects, likely related to tannin content (Anand *et al*., 2015). Wang *et al*. (2023) showed that tannic acid disrupts *S. aureus* membranes by downregulating genes like murB, murG, and tagA. Dong *et al*. (2017) further reported preferential binding of tannic acid to the bacterial peptidoglycan layer, with 41.2% binding in *S. aureus* versus 21.3% in *E. coli*, suggesting that cell wall composition influences susceptibility.

3. Time-dependent bactericidal effect of Indian almond leaf aqueous extract

The bactericidal effect of Indian almond leaf aqueous extract against *S. aureus* was assessed over time. At 10^4 CFU/ml, treatment with 0.35 and 0.4 mg/ml extracts showed a progressive reduction in colony counts from 0 to 24 hours. After 2 hours, colony numbers were 115 and 113 (61.66% and 62.33% inhibition), which decreased to 39 and 17 at 4 hours (87% and 94.33% inhibition). Complete inhibition (100%) occurred at 8 hours for 0.4 mg/ml and at 24 hours for 0.35 mg/ml. Colony counts declined with time for both concentrations, showing statistically significant negative correlations (r_s = –1.000, $p < 0.001$ and r_s = –0.975, $p = 0.02$, respectively). In contrast, 145 colonies were observed at 24 hours in the amoxicillin-treated group (10 µg/ml). These results confirm a time- and concentration-dependent bactericidal effect, as summarized in Table 2.

Table 2 Time-dependent bactericidal activity of Indian almond leaf aqueous extract

Indian almond leaf aqueous extract (mg/ml)	Hour	Colony count	% Bactericidal activity	Correlation coefficient (r_s)	p-value
0.35	0	>300	0	-1.000	< 0.001
	2	115	61.66		
	4	39	87		
	6	16	94.66		
	8	3	99		
	24	0	100		
0.4	0	>300	0	-0.975	0.02
	2	113	62.33		
	4	17	94.33		
	6	5	98.33		
	8	0	100		
	24	0	100		
Amoxicillin 10 µg	0	>300			
(Positive control)	2-8	>300	NA	NA	NA
	24	145			

Note: r_s stands for Spearman correlation coefficient, and NA stands for not analyzed. The correlation is significant at the 0.05 level ($p < 0.05$).

These findings indicate that Indian almond leaf aqueous extract exerts a statistically significant time-dependent bactericidal effect against *S. aureus*. The progressive reduction in viable bacterial colonies from 2 to 24 hours suggests that tannins, flavonoids, and phenolic acids gradually interact with bacterial cell structures, particularly the cell wall (Dong *et al*., 2017). Supporting this, Olchowik-Grabarek *et al*. (2023) demonstrated that gallotannin (PGG) at its MIC (76 µg/ml) sustained suppression of *S. aureus* growth over 12 hours. Wang et al. (2023) further demonstrated that tannic acid disrupts cell envelope integrity, ribosome assembly, and amino acid metabolism, inducing bacterial stress and metabolic exhaustion. This aligns with prior findings showing tannic acid progressive weakening of bacterial viability, ultimately leading to clearance within 24 hours depending on concentration. Together, the present results and prior studies support that tannins in Indian almond leaf extract contribute to time and concentration-dependent bactericidal activity, with bacterial clearance occurring between 2 to 8 hours, and complete elimination by 24 hours.

Conclusion

Indian almond leaf aqueous extract demonstrates promising bactericidal activity against *S. aureus*, with an MBC observed at 0.35–0.4 mg/ml. The effect was both concentration- and time-dependent, achieving complete bacterial elimination within 8–24 hours. While these findings highlight the potential of tannin-rich plant extracts for antibacterial use, further studies on extract standardization, safety, and formulation are essential to advance their application in veterinary or medical settings.

Acknowledgment

The vet student project no. 2563-64-05 was financially supported by Mahanakorn University of Technology (MUT)

References

Akiyama, H., Fujii, K., Yamasaki, O., Oono, T., & Iwatsuki, K. (2001). Antibacterial action of several tannins against *Staphylococcus aureus*. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, *48*(4), 487–491.

Anand, A., Divya, N., & Kotti, P. (2015). An updated review of *Terminalia catappa*. *Pharmacognosy Reviews*, *9*(18), 93.

Andrews, J. M. (2004). BSAC standardized disc susceptibility testing method (version 3). *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, *53*(5), 713–728.

Arapitsas, P. (2012). Hydrolyzable tannin analysis in food. *Food Chemistry*, *135*(3), 1708–1717.

Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, *6*(2), 71–79.

Bolling, B. W. (2017). Almond polyphenols: Methods of analysis, contribution to food quality, and health promotion. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *16*(3), 346–368.

Bule, M., Khan, F., Farrukh, N. M., & Niaz, K. (2020). Tannins (hydrolysable tannins, condensed tannins, phlorotannins, flavono-ellagitannins). In *Recent advances in natural products analysis* (pp. 132–146). Elsevier.

Chansue, N., & Assawawongkasem, N. (2008). The *in vitro* antibacterial activity and ornamental fish toxicity of the water extract of Indian almond leaves (*Terminalia catappa* Linn.). *Khon Kaen University Veterinary Journal*, *18*(1), 36–45.

Das, A. K., Islam, M. N., Faruk, M. O., Ashaduzzaman, M., & Dungani, R. (2020). Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany*, *135*, 58–70.

Desam, N. R., & Al-Rajab, A. J. (2022). Herbal biomolecules: Anticancer agents. In S. C. Mandal, A. K. Nayak, & A. K. Dhara (Eds.), *Herbal biomolecules in healthcare applications* (pp. 435–474). Academic Press.

Dong, G., Liu, H., Yu, X., Zhang, X., Lu, H., Zhou, T., & Cao, J. (2017). Antimicrobial and anti-biofilm activity of tannic acid against *Staphylococcus aureus*. *Natural Product Research*, *32*(18), 2225–2228.

Heinrich, N. A., Eisenschenk, M., Harvey, R. G., & Nuttall, T. (2019). *Skin diseases of the dog and cat* (3rd ed.). CRC Press.

Kahlaoui, M., Vecchia, S. B. D., Giovine, F., Kbaier, H. B. H., Bouzouita, N., Pereira, L. B., & Zeppa, G. (2019). Characterization of polyphenolic compounds extracted from different varieties of almond hulls (*Prunus dulcis* L.). *Antioxidants*, *8*(12), Article 647.

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2019). *Brock biology of microorganisms* (15th global ed.). Pearson.

Malawa, S., Nuntapong, N., Suanyuk, N., & Thongprajukaew, K. (2022). Addition of different concentrations of Indian almond (*Terminalia catappa*) leaf extract to aquarium water resulted in improved water quality and increased bubble nest formation by male Siamese fighting fish (*Betta splendens*) without having any consistent negative effects on growth metrics and blood chemistry. *Aquaculture International*, *30*(6), 3269–3288. https://doi.org/10.1007/s10499-022-00960-1

Malik, S., Peng, H., & Barton, M. D. (2005). Antibiotic resistance in staphylococci associated with cats and dogs. *Journal of Applied Microbiology*, *99*(6), 1283–1293.

Moon, D.-C., Choi, J.-H., Boby, N., Kang, H.-Y., Kim, S.-J., Song, H.-J., Park, H.-S., Gil, M.-C., Yoon, S.-S., & Lim, S.-K. (2022). Bacterial prevalence in skin, urine, diarrheal stool, and respiratory samples from dogs. *Microorganisms*, *10*(8), Article 1668.

Muangthai, P. (2015). Utilization of extracted substance from Indian almond leaves, *Terminalia catappa* L., for preparation of folk medicinal cream for the use of skin protection. *Journal of Applied and Natural Science*, *7*, 144–148.

Mueller-Harvey, I. (2001). Analysis of hydrolysable tannins. *Animal Feed Science and Technology*, *91*(1), 3–20.

Nikaido, H. (2009). Multidrug resistance in bacteria. *Annual Review of Biochemistry*, *78*, 119–146.

Olchowik-Grabarek, E., Sekowski, S., Mies, F., Bitiucki, M., Swiecicka, I., Abdulladjanova, N., Shlyonsky, V., & Zamaraeva, M. (2023). Electrophysiological and spectroscopic investigation of hydrolysable tannins interaction with α-hemolysin of *S. aureus*. *Bioelectrochemistry*, *150*, Article 108318. https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108318

Thansuwan, R., Jitturongarpron, J., Buatib, J., Tangjaroenchai, T., & Muangsue, N. (2019, May 22–24). Phytochemical screening and antimicrobial activity of Indian almond leaf extracts. In *Proceedings of the International Conference on Biodiversity 2019 (IBD2019)* (pp. 86–88). Centara Grand & Bangkok Convention Centre, CentralWorld, Bangkok, Thailand.

Wang, J., Sheng, Z., Liu, Y., Chen, X., Wang, S., & Yang, H. (2023). Combined proteomic and transcriptomic analysis of the antimicrobial mechanism of tannic acid against *Staphylococcus aureus*. *Frontiers in Pharmacology*, *14*, Article 1178177.

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันสำหรับการจำแนกสายพันธุ์ข้าวด้วยตัวดำเนินการพรีวิทท์ที่ปรับแต่งเฉพาะ

Enhancing the efficiency of a convolutional neural network model for rice variety classification using a customized prewitt operator

เจษฎา สิงห์ทองชัย[1], สุทธิพงษ์ คล่องดี[2] และณัฐวุฒิ ศรีวิบูลย์[1*]

Jatsada Singthongchai[1], Suttipong Klongdee[2] and Nattavut Sriwiboon[1*]

Received: 16 September 2024 ; **Revised:** 22 April 2025 ; **Accepted:** 5 June 2025

บทคัดย่อ

การจำแนกสายพันธุ์ข้าวเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมเกษตรกรรม ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการจำแนกสายพันธุ์ข้าวโดยใช้ Convolutional Neural Network (CNN) ร่วมกับ Prewitt Operator สำหรับการตรวจจับขอบที่ชัดเจนจากภาพถ่ายเมล็ดข้าว เทคนิคนี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการแยกแยะเมล็ดข้าวที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดล CNN ร่วมกับ Prewitt Operator สามารถเพิ่มความแม่นยำของการจำแนกได้ถึง 98.5% ซึ่งสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้วิธีการอื่น เช่น Sobel และ Canny Edge Detection ซึ่งให้ความแม่นยำในช่วง 85-96% บทความนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนารูปแบบ CNN และ Prewitt Operator รวมถึงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกเมล็ดข้าวในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: พันธุ์ข้าว, การเรียนรู้เชิงลึก, โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน, EfficientNetB0

Abstract

Rice variety classification is a crucial process in the agricultural industry, directly impacting product quality and production efficiency. This article presents a method for enhancing rice variety classification efficiency using a Convolutional Neural Network (CNN) integrated with a customized Prewitt operator for precise edge detection from grain images. This technique improves the accuracy of distinguishing between rice varieties with similar characteristics. The experimental results demonstrate that the CNN model combined with the Prewitt operator achieves a classification accuracy of 98.5%. This performance surpasses previous research using other methods, such as Sobel and Canny edge detection, which reported accuracies ranging from 85% to 96%. This article discusses the development stages of the CNN model and the Prewitt operator and provides a comparison with related works, highlighting its effectiveness across diverse environments.

Keywords: Rice variety, deep learning, convolutional neural networks, EfficientNetB0

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

[2] คณะเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

[1] Assistant professor, Faculty of Sciences and Health Technology, Kalasin University, Kalasin

[2] Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi Campus, Chanthaburi

* Corresponding author: E-mail: nattavut.sr@ksu.ac.th

บทนำ

การจำแนกสายพันธุ์ข้าวเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมเกษตรกรรม อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน การจำแนกสายพันธุ์ข้าวประสบปัญหาเกี่ยวกับความไม่แม่นยำเนื่องจากลักษณะที่คล้ายคลึงกันระหว่างสายพันธุ์ การจำแนกข้าวอย่างแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อควบคุมคุณภาพและปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต ในปัจจุบันเทคโนโลยีการประมวลผลภาพและการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) (LeCun *et al*., 2015) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาด้านการจำแนกสายพันธุ์ข้าว โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNN) (Krizhevsky *et al*., 2012) ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์และตรวจจับคุณลักษณะเชิงลึกของภาพ (Arunsiriwattana *et al*., 2021; Kongchai, 2023; Rattanapoka, 2024; Senawong *et al*., 2022; Sriwiboon, 2021) อย่างไรก็ตามการใช้โมเดล CNN เพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอในการจำแนกสายพันธุ์ข้าวที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน อีกทั้งปัญหาของงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Chatnuntawech *et al*., 2018; Gayathri Devi & Siddappa, 2017; Kolkure & Shaikh, 2017; Mousavirad & Minaei, 2012; Zareiforoush *et al*., 2016) ที่เสนอวิธีการจำแนกเมล็ดข้าวยังคงมีข้อจำกัดในการตรวจจับขอบที่ไม่ชัดเจน

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดล CNN ด้วยการใช้ Prewitt Operator (Prewitt, 1970) ซึ่งเป็นเทคนิคตรวจจับขอบที่ได้รับการปรับแต่งเฉพาะสำหรับข้อมูลภาพเมล็ดข้าว การดำเนินการดังกล่าวช่วยเพิ่มความสามารถในการแยกแยะรายละเอียดสำคัญของเมล็ดข้าว และช่วยให้การจำแนกสายพันธุ์ข้าวมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ CNN ร่วมกับ Prewitt Operator สามารถเพิ่มความแม่นยำ (Accuracy) ของโมเดลได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในโมเดล EfficientNetB0 ที่มีค่า ความแม่นยำสูงสุดถึง 98.5% ซึ่งสูงกว่าการใช้ CNN เพียงอย่างเดียวที่มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 96.8% โมเดลอื่น ๆ เช่น ResNet50V2 และ InceptionV3 ก็มีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดด้วยการใช้ Prewitt Operator บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการปรับแต่ง Prewitt Operator การสร้างโมเดล CNN ที่เหมาะสมและผลการทดลองที่แสดงถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในการจำแนกสายพันธุ์ข้าว

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเสนอแนวทางการปรับแต่ง Prewitt Operator สำหรับจำแนกสายพันธุ์ข้าว เพื่อสร้างโมเดล (Model) โดยใช้ CNN สำหรับจำแนกสายพันธุ์ข้าวที่แตกต่างกัน 5 สายพันธุ์

2. เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับแต่งเฉพาะให้กับ Prewitt Operator ที่เสนอโดยงานวิจัยนี้ (Chatnuntawech *et al*., 2018; Gayathri Devi & Siddappa, 2017; Kolkure & Shaikh, 2017; Mousavirad & Minaei, 2012; Zareiforoush *et al*., 2016)

3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกสายพันธุ์ข้าวให้กับแบบจำลอง CNN

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN)

โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกออกแบบมาเพื่อการประมวลผลข้อมูลภาพ โดยอาศัยการทำงานของ convolutional layers ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับคุณลักษณะเฉพาะของภาพ เช่น ขอบ, รูปทรง, และเนื้อสัมผัส CNN มีบทบาทสำคัญในงานด้านการจำแนกภาพ การตรวจจับวัตถุ และการแบ่งส่วนภาพ หนึ่งในสถาปัตยกรรมยอดนิยมของ CNN คือ VGG16 และ VGG19 (Simonyan & Zisserman, 2015) ซึ่งเน้นการออกแบบที่เรียบง่ายและใช้การเรียงตัวของ convolutional layers หลายชั้น โดย VGG16 มี 16 ชั้น และ VGG19 มี 19 ชั้น ส่วน InceptionV3 (Szegedy *et al*., 2016) ใช้เทคนิค Inception module ที่รวมหลายขนาดของ convolution ใน layer เดียว ทำให้สามารถจับคุณลักษณะหลากหลายได้ในขั้นตอนเดียว ต่อมาคือ ResNet50V2 (He *et al*., 2016) ซึ่งใช้ Residual Blocks เพื่อลดปัญหา vanishing gradient ในการฝึกโมเดลที่ลึกมาก ResNet50V2 มี 50 layers และมีการปรับปรุงการคำนวณระหว่าง layer ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น ในขณะที่ EfficientNetB0 (Tan & Le, 2019) มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการปรับขนาดของความลึก (depth), ความกว้าง (width), และความละเอียดของภาพ (resolution) อย่างสมดุล ทำให้ EfficientNet เป็นโมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงในขณะที่ใช้พารามิเตอร์น้อยกว่ารุ่นอื่น ๆ

2. การตรวจจับขอบ (Edge Detection)

Edge Detection เป็นเทคนิคสำคัญในประมวลผลภาพดิจิทัลที่ใช้ระบุตำแหน่งของขอบ (edges) ของวัตถุในภาพ โดยอาศัยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของพิกเซล (pixel) การตรวจจับขอบช่วยแยกวัตถุหรือระบุขอบเขตในภาพเพื่อวิเคราะห์เพิ่มเติม มีหลายวิธีที่นิยมใช้ เช่น

Prewitt Operator ซึ่งใช้การคำนวณขอบในแนวนอนและแนวตั้งด้วยคอนโวลูชัน (convolution) กับ kernel ขนาด 3x3 อีกตัวอย่างหนึ่งคือ Sobel Operator ซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่คล้ายกับ Prewitt แต่ให้ความสำคัญกับจุดกลางมากกว่า ทำให้ผลลัพธ์มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้น นอกจากนี้ยังมี Roberts Cross Operator ที่ใช้ kernel ขนาด 2x2 ทำให้ตรวจจับขอบได้อย่างรวดเร็วแต่มีความไวต่อสัญญาณรบกวน ในขณะที่ Canny Edge Detection เป็นเทคนิคที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยผสานการทำ Gaussian Smoothing, Gradient Calculation, Non-maximum Suppression และ Double Thresholding เพื่อหาขอบที่ชัดเจนและแม่นยำ นอกจากนี้ยังมี Laplacian of Gaussian (LoG) ที่ใช้การรวม Gaussian Smoothing กับ Laplacian Gradient เพื่อการตรวจจับขอบที่ละเอียดมากขึ้น Edge Detection จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในหลายงาน เช่น การแยกวัตถุในภาพ การวิเคราะห์ภาพทางการแพทย์ และการนำไปใช้ในปัญหาการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (computer vision) อื่น ๆ

3. การดำเนินการพรีวิทท์ (Prewitt Operator)

Prewitt คือหนึ่งในตัวกรองการตรวจจับขอบ (edge detection) ที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อหาเส้นขอบหรือขอบเขตของวัตถุในภาพ ตัวกรองนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Judith M. S. Prewitt ในปี ค.ศ. 1970 (Prewitt, 1970) และเป็นหนึ่งในวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจจับขอบหลักการทำงานของ Prewitt Operator ทำงานโดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกเซลในภาพ เพื่อระบุส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมักจะเป็นตำแหน่งของขอบของวัตถุในภาพ โดยใช้น้ำหนักที่ต่างกันในทิศทางแนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal) ตัวกรอง Prewitt จะใช้การคำนวณกราดิเอนต์ (Gradient) ในทิศทาง X และ Y โดยใช้ convolutional kernel ดังนี้

Kernel ในแนวนอน (Horizontal Kernel, G_x):

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kernel ในแนวตั้ง (Vertical Kernel, G_y):

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ขั้นตอนการคำนวณขอบด้วย Prewitt

1) คำนวณ Gradient ในทิศทาง X และ Y โดยใช้ kernel Gx และ Gy กับภาพต้นฉบับ (Original Image) เพื่อหา gradient ในแต่ละทิศทาง

2) คำนวณ *Magnitude* ของ Gradient โดยใช้สูตรเพื่อคำนวณความเข้มข้นของ gradient ดังนี้

$$Magnitude = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

หรือในกรณีที่ต้องการการประมวลผลที่เร็วขึ้น สามารถใช้การประมาณ:

$$Magnitude \approx |G_x| + |G_y| \quad (4)$$

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prakash และคณะ (Prakash *et al*., 2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกสายพันธุ์ข้าวโดยใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ได้แก่ VGG16 และ Vanilla CNN บนชุดข้อมูล Rice Image Dataset ซึ่งประกอบด้วยภาพเมล็ดข้าวจำนวน 75,000 ภาพ ครอบคลุมข้าว 5 สายพันธุ์ ได้แก่ Arborio, Basmati, Ipsala, Jasmine และ Karacadag ผลการทดลองแสดงว่าโมเดล VGG16 ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดที่ประมาณ 96%

Vania และคณะ (Vania *et al*., 2023) ใช้สถาปัตยกรรม MobileNetV2 ร่วมกับเทคนิค Transfer Learning เพื่อจำแนกข้าวจากชุดข้อมูลเดียวกัน โดยเน้นที่การสร้างโมเดลที่มีขนาดเล็กและประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์แสดงว่า MobileNetV2 สามารถจำแนกพันธุ์ข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความแม่นยำประมาณ 98.2% ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์พกพาหรือระบบฝังตัว

Shardy (Shardy, 2023) ได้นำสถาปัตยกรรม VGG16 ที่ผ่านการฝึกบนชุดข้อมูล ImageNet มาปรับใช้กับ Rice Image Dataset โดยใช้วิธี Transfer Learning ผลการทดลองแสดงว่าโมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะของเมล็ดข้าวได้อย่างแม่นยำและหลีกเลี่ยงปัญหา overfitting ได้ดี โดยได้ค่าความแม่นยำประมาณ 97%

Noroozi (Noroozi, 2023) ได้พัฒนาโมเดล CNN ขึ้นใหม่โดยไม่ใช้โมเดลที่ผ่านการฝึกไว้ล่วงหน้า โดยฝึกโมเดลตั้งแต่เริ่มต้นบน Rice Image Dataset แม้จะไม่มีการใช้ Transfer Learning แต่โมเดลที่สร้างขึ้นสามารถจำแนกสายพันธุ์ข้าวได้อย่างแม่นยำในระดับประมาณ 96.5% ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของ CNN ในการเรียนรู้จากข้อมูลดิบโดยตรง

Jiang และคณะ (Jiang *et al*., 2022) ใช้ Prewitt Operator เพื่อตรวจจับขอบใบพืชที่ติดเชื้อ เช่น โรคใบจุดและราแป้ง โดยใช้ภาพจากกล้อง RGB การศึกษาพบว่า Prewitt Operator ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับขอบและสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ผลการทดลองแสดงว่าความแม่นยำในการจำแนกพืชที่เป็นโรคสูงถึง 92%

Ali และคณะ (Ali *et al*., 2021) ใช้ Prewitt Operator ในการตรวจจับขอบของภาพทางการแพทย์ เช่น X-ray, MRI และ CT Scan เพื่อแยกเนื้องอกหรืออวัยวะออกจากพื้นหลัง การใช้ Prewitt ช่วยเพิ่มความคมชัดของขอบและเพิ่มความแม่นยำในการวินิจฉัย โดยเฉพาะในภาพที่มีสัญญาณรบกวน ผลการทดลองแสดงว่าความแม่นยำในการวินิจฉัยทางการแพทย์เพิ่มขึ้นถึง 89%

Martinez และคณะ (Martinez *et al*., 2023) ใช้ Prewitt Operator ในการวิเคราะห์ภาพดาวเทียมเพื่อตรวจจับขอบของภูมิประเทศ เช่น พื้นที่ป่าและเกษตร ผลการทดลองพบว่า Prewitt Operator สามารถแยกขอบเขตของพื้นที่ได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ การตรวจจับขอบนี้ช่วยให้การวิเคราะห์ภาพระยะไกลมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในภาพที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ

Chen และคณะ (Chen *et al*., 2020) เปรียบเทียบ Prewitt Operator กับ Sobel และ Canny ในการตรวจจับขอบของป้ายจราจรสำหรับยานยนต์อัตโนมัติ ผลการศึกษาพบว่า Prewitt Operator ตรวจจับขอบได้รวดเร็วและแม่นยำ โดยมีความแม่นยำสูงถึง 85% ในสภาพแสงที่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับ Sobel และ Canny การตรวจจับขอบที่รวดเร็วนี้ช่วยในการพัฒนาระบบรู้จำป้ายจราจร

Nguyen และคณะ (Nguyen *et al*., 2021) ใช้ Prewitt Operator ในการตรวจจับขอบใบหน้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดคุณลักษณะสำคัญจากภาพในระบบรู้จำใบหน้า ผลการทดลองแสดงว่า Prewitt Operator ช่วยปรับปรุงความแม่นยำได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสภาวะแสงที่ไม่สม่ำเสมอ ความแม่นยำของระบบจดจำใบหน้าเพิ่มขึ้นเป็น 87% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้การตรวจจับขอบ

Raj และคณะ (Raj *et al*., 2023) ใช้ Prewitt Operator ในการตรวจจับขอบพืชจากภาพที่ถ่ายโดยหุ่นยนต์เกษตร เพื่อเพิ่มความสามารถในการแยกพืชจากสิ่งแวดล้อมและช่วยในการดำเนินงาน เช่น การเก็บเกี่ยวและการตัดหญ้า การใช้ Prewitt Operator ช่วยลดเวลาในการประมวลผลและเพิ่มความแม่นยำในการแยกแยะวัตถุ ผลการทดลองแสดงว่าหุ่นยนต์สามารถแยกพืชจากพื้นหลังได้แม่นยำถึง 88% และลดเวลาในการประมวลผลได้ถึง 15% ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์เกษตร

Wang และคณะ (Wang *et al*., 2019) ประยุกต์ใช้ Prewitt Operator ในการตรวจจับขอบตัวอักษรในภาพถ่ายเอกสารดิจิทัลเพื่อการรู้จำตัวอักษร (Optical Character Recognition: OCR) ผลการทดลองแสดงว่า Prewitt Operator ช่วยแยกตัวอักษรออกจากพื้นหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มความแม่นยำในการแปลงภาพเป็นข้อความ การใช้เทคนิคนี้ช่วยลดข้อผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนในภาพคุณภาพต่ำ ผลลัพธ์พบว่า Prewitt Operator ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการแปลงภาพเป็นข้อความได้สูงถึง 92%

Mousavirad และคณะ (Mousavirad & Minaei, 2012) ใช้ Backpropagation Neural Network ร่วมกับคุณลักษณะทางรูปทรงของเมล็ดข้าว เพื่อจำแนกประเภทและคุณภาพของข้าวจากภาพถ่าย การใช้ฟีเจอร์เชิงรูปทรงช่วยในการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของเมล็ดข้าวที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีความแม่นยำอยู่ที่ 91.09% ซึ่งยังต่ำกว่าวิธีการที่ใช้ CNN ร่วมกับการตรวจจับขอบ

Zareiforoush และคณะ (Zareiforoush *et al*., 2016) ใช้ CNN ร่วมกับเทคนิค metaheuristic เพื่อจำแนกคุณภาพของเมล็ดข้าวจากภาพถ่าย การใช้ metaheuristic ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกและตรวจสอบคุณภาพของข้าวได้ถึง 96.3% โดยเน้นไปที่การใช้ CNN เพื่อวิเคราะห์คุณภาพข้าวที่ผ่านการขัดและการแยกประเภทที่มีรายละเอียดสูง

Kolkure และ Shaikh (Kolkure & Shaikh, 2017) งานวิจัยนี้พัฒนาโมเดล CNN ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของข้าว โดยใช้ฟีเจอร์ที่ดึงออกมาจากภาพถ่ายเมล็ดข้าวเพื่อตรวจสอบคุณภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า CNN สามารถดึงคุณลักษณะภาพได้ดีและให้ความแม่นยำ 92.5% ในการจำแนกข้าวที่มีคุณภาพแตกต่างกัน

Gayathri Devi และคณะ (Gayathri Devi & Siddappa, 2017) ใช้ CNN ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อจำแนกคุณภาพของเมล็ดข้าว ผลการทดลองแสดงว่า CNN สามารถแยกข้าวที่มีคุณภาพแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายของเมล็ดข้าว โมเดล CNN สามารถดึงคุณลักษณะสำคัญจากภาพได้โดยไม่ต้องใช้การคำนวณทางฟีเจอร์เชิงลึก ทำให้ได้ ความแม่นยำ 93% ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีในการตรวจสอบคุณภาพของข้าว

Itthi Chatnuntawech (Chatnuntawech *et al*., 2018) งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้ Deep Convolutional Neural Network (DCNN) ร่วมกับการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมเพื่อจำแนกสายพันธุ์ข้าว โดยใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่และเชิงสเปกตรัมจากภาพถ่ายเมล็ดข้าว ความสามารถของ CNN ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก hyperspectral imaging ทำให้โมเดลสามารถเพิ่มความแม่นยำขึ้นสูงสุดถึง 96.3% ในการจำแนกข้าว

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ยังประสบปัญหาในการจำแนกเมล็ดข้าวที่มีลักษณะคล้ายกันเมื่อจำแนก

สายพันธุ์ที่หลากหลาย งานวิจัย (Gayathri Devi & Siddappa, 2017) แสดงให้เห็นว่าแม้ CNN จะมีศักยภาพสูงในการวิเคราะห์คุณลักษณะจากภาพ แต่ยังขาดการตรวจจับขอบที่ละเอียด ทำให้การแยกข้าวบางสายพันธุ์ไม่แม่นยำเพียงพอ ในขณะที่ (Mousavirad & Minaei, 2012) ใช้ Backpropagation Neural Network ร่วมกับการวิเคราะห์รูปทรง ซึ่งให้ผลดีในบางกรณี แต่ยังมีความแม่นยำต่ำกว่าวิธีที่ใช้ CNN สำหรับงานที่ซับซ้อนกว่า (Kolkure & Shaikh, 2017) พยายามแก้ไขปัญหานี้ด้วยการใช้ CNN ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพเพิ่มเติม แต่ยังคงมีข้อจำกัดในแง่ความแม่นยำของการตรวจจับขอบส่วน (Chatnuntawech *et al*., 2018) ได้พัฒนาระบบที่ใช้ hyperspectral imaging ร่วมกับ Deep CNN เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการจำแนกสายพันธุ์ข้าว แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาขอบที่ไม่ชัดเจนได้ทั้งหมด งานวิจัย (Zareiforoush *et al*., 2016) ใช้ metaheuristic techniques ร่วมกับ CNN ซึ่งเพิ่มความแม่นยำในการจำแนก แต่ยังคงมีปัญหาในกรณีที่ต้องตรวจจับขอบที่ซับซ้อน

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดล CNN สำหรับการจำแนกสายพันธุ์ข้าวโดยใช้ Prewitt Operator ที่ได้รับการปรับแต่งเฉพาะ ซึ่งในกระบวนการวิจัยแสดงดัง Figure 1 โดยรายละเอียดของวิธีการที่เสนอโดยงานวิจัยนี้แสดงขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลภาพเมล็ดข้าวที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากฐานข้อมูล Rice Image Dataset บนเว็บไซต์ Kaggle ซึ่งประกอบด้วยภาพเมล็ดข้าว 5 สายพันธุ์ สายพันธุ์ละ 15,000 ภาพ ได้แก่ Arborio, Basmati, Ipsala, Jasmine, Karacadag รวม 75,000 ภาพ โดยแต่ละสายพันธุ์มีจำนวนภาพที่เพียงพอสำหรับการฝึกและทดสอบโมเดล CNN เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและครอบคลุมทุกประเภท

2. การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลภาพเมล็ดข้าวทั้งหมดถูกปรับขนาดและจัดให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการป้อนเข้าสู่โมเดล CNN ขนาดภาพที่ใช้คือ 224x224 พิกเซล เพื่อความเข้ากันได้กับสถาปัตยกรรม CNN ที่จะนำมาใช้ และมีการปรับค่าพิกเซลให้อยู่ในช่วง 0-1 โดยใช้การ normalize เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฝึกโมเดล

3. Prewitt Operator ที่ปรับแต่งเฉพาะ

ในขั้นตอนนี้ การดำเนินการ Prewitt Operator ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจจับขอบของภาพเมล็ดข้าว โดยเน้นไปที่การปรับแต่งให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของภาพเมล็ดข้าวแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งกระบวนการนี้มีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงข้อมูลคุณลักษณะที่สำคัญของเมล็ดข้าวออกมาให้ได้มากที่สุด ในการวิจัยนี้มีการปรับแต่ง Prewitt Operator เพื่อให้สามารถดึงข้อมูลลักษณะเฉพาะจากภาพเมล็ดข้าวได้อย่างเหมาะสม การปรับแต่งมีขั้นตอนดังนี้

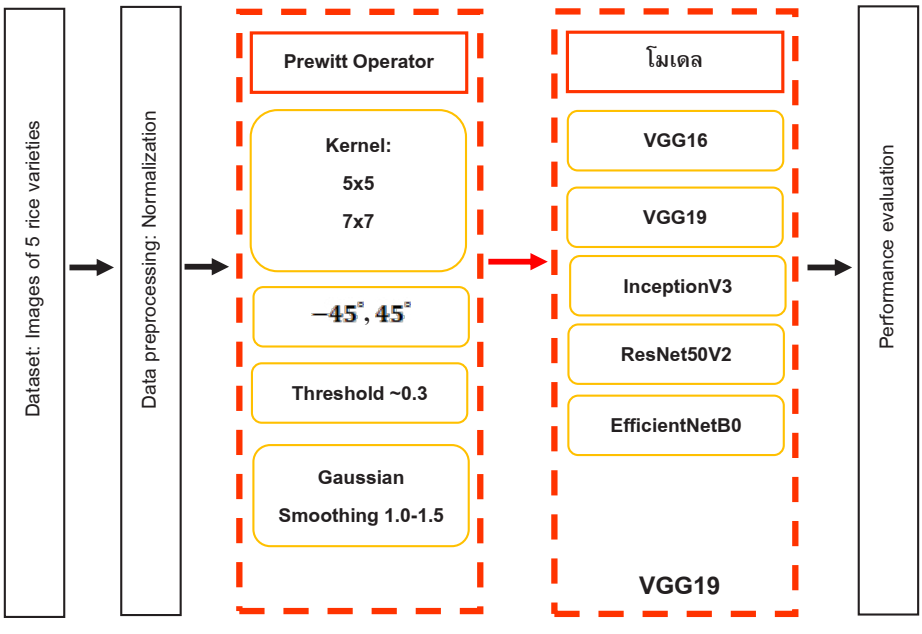


Figure 1 Research Methodology Flowchart

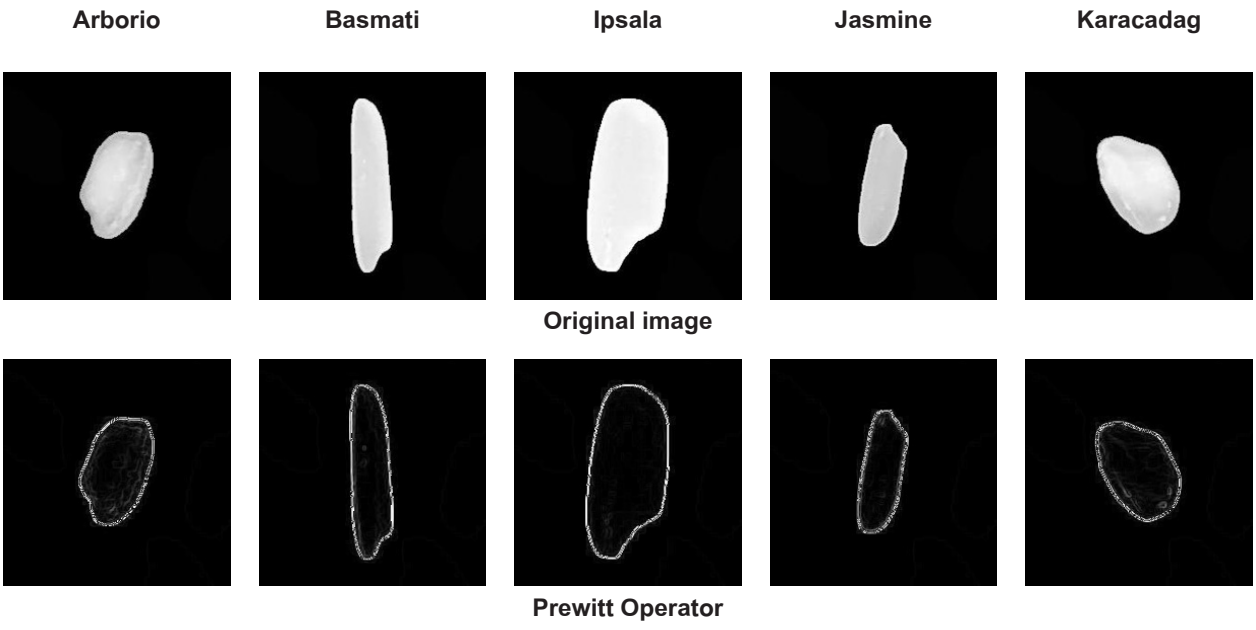


Figure 2 Results from the customized Prewitt operator process

1) การปรับขนาด Kernel ขนาดของ kernel ถูกปรับให้เข้ากับขนาดของภาพเมล็ดข้าวที่ใช้ โดยเน้นที่การใช้ kernel ขนาดใหญ่ขึ้น โดยกำหนดขนาด 5x5 และ 7x7 ในกรณีนี้ Prewitt Operator ถูกปรับให้ใช้ kernel ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากขนาดปกติ 3x3 เป็น 5x5 และ 7x7 เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับขอบที่ซับซ้อนและละเอียดขึ้น ซึ่ง kernel ขนาดใหญ่สามารถจับลักษณะที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ได้ดีกว่า

$$G_x = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) การใช้ Prewitt ในหลายทิศทาง นอกจากการใช้ Prewitt ในทิศทางแนวแกน X และ Y แบบพื้นฐาน ยังมีการเพิ่มการตรวจจับขอบในทิศทางแนวทแยง เพื่อให้สามารถดึงขอบภาพในทิศทางที่แตกต่างกันได้การใช้ kernel ในทิศทาง 45 องศาและ -45 องศา เพื่อตรวจจับขอบที่มีลักษณะเอียงเฉียง ช่วยให้ได้ข้อมูลขอบที่หลากหลายและสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในภาพเมล็ดข้าว ซึ่งมีความสำคัญในการแยกแยะขอบที่อยู่ในลักษณะเฉียงหรือเอียง ทำให้โมเดลสามารถตรวจจับลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงธรรมดาได้ดียิ่งขึ้น

$$G45 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$G-45 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) การปรับค่า Threshold ค่า threshold ที่ใช้ในการแยกแยะระหว่างขอบที่ตรวจจับได้และพื้นหลังถูกปรับแต่งให้เหมาะสมกับภาพเมล็ดข้าว โดยกำหนด threshold ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ~0.3 ซึ่งเป็นค่าที่สมดุลในการรักษาขอบที่สำคัญและลดการเกิดขอบที่ไม่จำเป็นค่า threshold ที่เหมาะสมช่วยให้การตรวจจับขอบของเมล็ดข้าวมีความแม่นยำขึ้น โดยไม่ทำให้เกิดการตรวจจับขอบที่เกิดจาก noise หรือสัญญาณรบกวนที่ไม่จำเป็น ซึ่งช่วยให้ผลลัพธ์ของการจำแนกขอบมีความชัดเจน

4) การใช้งานร่วมกับการกรอง Gaussian (Gaussian Smoothing) ก่อนการดำเนินการ Prewitt มีการใช้การกรอง Gaussian เพื่อลด noise ในภาพเมล็ดข้าว ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับขอบและลดผลกระทบจากการตรวจจับขอบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน โดยในงานวิจัยนี้กำหนดค่า Sigma ที่ใช้ในการคำนวณ Gaussian Smoothing อยู่ในช่วง 1.0-1.5 ซึ่งช่วยให้ภาพเรียบเนียนมากขึ้น ลด noise ในภาพโดยไม่ทำให้ภาพเบลอเกินไป ผลการทดลองนำภาพเมล็ดข้าว 5 สายพันธุ์ ได้แก่ Arborio, Basmati, Ipsala, Jasmine, Karacadag ผ่านกระบวนการ Prewitt Operator ที่ได้รับการปรับแต่งเฉพาะ แสดงดัง Figure 2

4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิจัยนี้มีการใช้เครื่องมือโดยใช้ คอมพิวเตอร์ที่มี Graphics Processing Unit (GPU) คือ NVIDIA RTX 3080 Central Processing Unit (CPU) คือ INTEL CORE I5-10400 LGA 1200 RAM 32 GB มีประสิทธิภาพในการประมวลผลและฝึกโมเดล และพัฒนาด้วยเครื่องมือด้วยภาษา Python และไลบรารีประกอบด้วย TensorFlow, Keras, OpenCV และ NumPy สำหรับการประมวลผลภาพ

5. การวัดประสิทธิภาพ

การวัดประสิทธิภาพของโมเดล CNN สำหรับการจำแนกสายพันธุ์ข้าวจะถูกประเมินโดย Accuracy, Precision, Recall, และ F1-Score ซึ่งแต่มีรายละเอียดการประเมินผลลัพธ์ดังนี้

Accuracy คืออัตราส่วนของจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในชุดข้อมูลทดสอบ ค่านี้สะท้อนความแม่นยำของโมเดลในภาพรวม โดยคำนวณจาก

$$Accuracy = \frac{True\ Positive + True\ Negative}{Total\ Sample} \quad (9)$$

Precision คือสัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าเป็นสายพันธุ์ข้าวที่ถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าเป็นชนิดนั้นทั้งหมด ค่าที่สูงหมายถึงโมเดลมีความสามารถในการลดข้อผิดพลาดเชิงบวกเทียม (False Positive) ได้ดี

$$Precision = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Positive} \quad (10)$$

Recall คือสัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่ทำนายถูกต้องว่าเป็นสายพันธุ์ข้าวนั้นๆ ต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่เป็นสายพันธุ์นั้นในความเป็นจริง ตัวชี้วัดนี้สะท้อนความสามารถในการลดข้อผิดพลาดเชิงลบเทียม (False Negative):

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative} \quad (11)$$

F1-Score คือการวัดประสิทธิภาพที่รวมค่า Precision และ Recall โดยคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งเหมาะกับการประเมินเมื่อมีความไม่สมดุลของข้อมูลในแต่ละประเภท

$$F1 - score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision - Recall} \quad (12)$$

ผลการทดลอง

เมื่อทดลองโดยใช้โมเดล CNN เพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้ Prewitt Operator ผลลัพธ์แสดงถึงความสามารถของโมเดล CNN ในการจำแนกสายพันธุ์ข้าวดัง Table 1

การทดลองงานวิจัยใช้ชุดข้อมูล Rice Image Dataset โดยได้ถูกแบ่งออกเป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกโมเดลจำนวนร้อยละ 80 และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบจำนวนร้อยละ 20 โดยมีการสุ่มลำดับข้อมูลก่อนการแบ่งเพื่อป้องกันอคติที่อาจเกิดจากลำดับข้อมูลเดิม ทั้งนี้ได้มีการควบคุมให้แต่ละสายพันธุ์ข้าวทั้ง 5 สายพันธุ์มีจำนวนข้อมูลที่สมดุลในทั้งสองชุด เพื่อให้ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ การแบ่งชุดข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างสม่ำเสมอในทุกการทดลอง รวมถึงโมเดลพื้นฐาน (VGG16, MobileNetV2, ResNet50V2, InceptionV3, EfficientNetB0) และโมเดลที่เสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งผสานเทคนิค Prewitt Operator ที่ได้รับการปรับแต่งเฉพาะ

เมื่อทดลองโดยใช้โมเดล CNN ร่วมกับการใช้ Prewitt Operator ที่ได้รับการปรับแต่งค่าโดยงานวิจัยนี้ในการตรวจจับขอบของภาพเมล็ดข้าว โดยใช้การฝึกโมเดลในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทั้งหมดจำนวน 20 รอบการฝึก (Epochs) ผลลัพธ์ของโมเดลมีค่าความแม่นยำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Prewitt Operator ช่วยในการดึงข้อมูลขอบและลักษณะสำคัญของเมล็ดข้าวได้อย่างชัดเจนขึ้น ทำให้การแยกแยะสายพันธุ์ข้าวมีความแม่นยำมากขึ้น โดยผลการทดลองแสดงดัง Table 2 และการทดลองสามารถสรุปเปรียบเทียบระหว่างการใช้โมเดล CNN เพียงอย่างเดียวกับการใช้โมเดล CNN ร่วมกับ Prewitt Operator ดัง Figure 3 และสามารถแสดงผลการทดลองโดยพิจารณาจากค่า Training Accuracy ดัง Figure 4 และ Validation Loss ดัง Figure 5 โดย Figure 4 แสดงความแม่นยำของการฝึกสอนของโมเดล CNN ที่เสนอในช่วง 20 รอบการฝึก ผลลัพธ์แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความแม่นยำคงที่หลังรอบที่ 15 ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว Figure 5 แสดงค่าการสูญเสียของชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Loss) ตลอด 20 รอบการฝึก เริ่มต้นด้วยค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีแนวโน้มคงที่หลังจากรอบที่ 10 สะท้อนว่าโมเดลสามารถลดการ overfitting และบรรลุค่าที่เหมาะสมได้

รวมถึงงานวิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำของวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ข้อมูลภาพเมล็ดข้าวที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากฐานข้อมูล Rice Image Dataset บนเว็บไซต์ Kaggle แสดงดัง Table 3

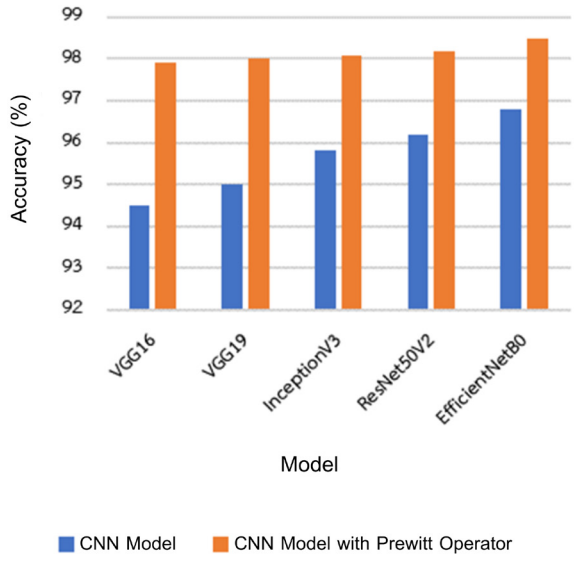


Figure 3 summarizes the comparison between using CNN alone and using CNN combined with the Prewitt Operator.

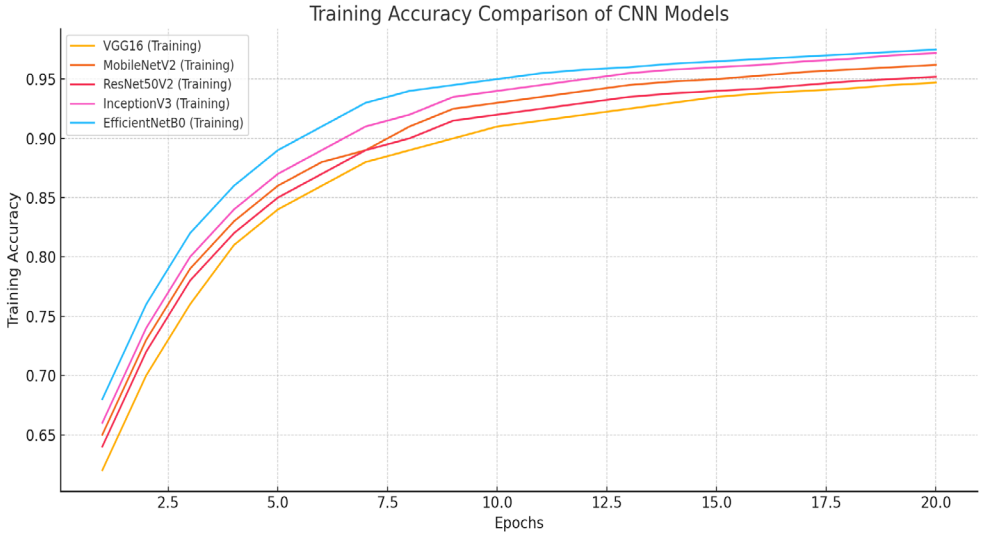


Figure 4 Training Accuracy

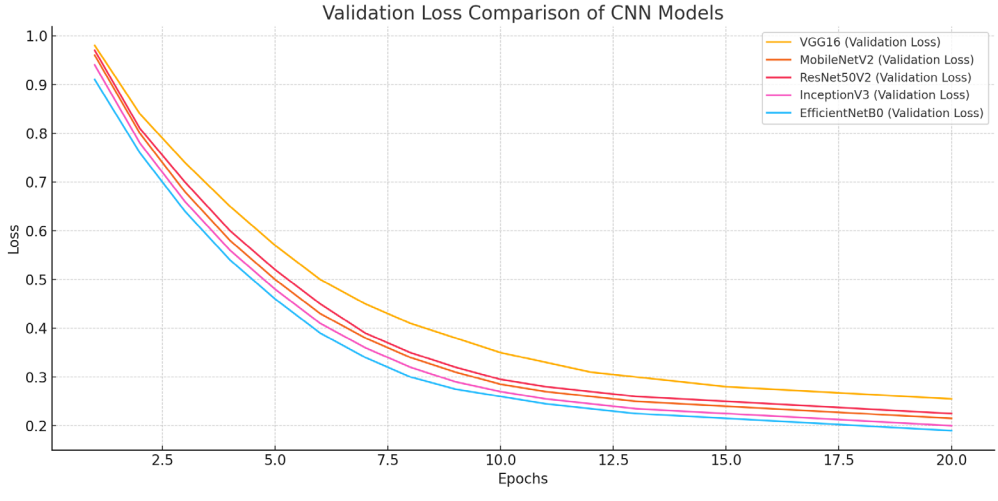


Figure 5 Validation Loss

Table 1 Results of the CNN model in classifying rice varieties

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
VGG16	94.5	94.2	94.4	94.3
VGG19	95.0	94.9	95.0	94.9
InceptionV3	95.8	95.5	95.7	95.6
ResNet50V2	96.2	96.1	96.2	96.1
EfficientNetB0	96.8	96.7	96.8	96.7

Table 2 Results of the CNN model combined with the specifically customized Prewitt Operator process for rice variety classification

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
VGG16	97.9	97.8	97.9	97.8
VGG19	98	98	98	98
InceptionV3	98.1	98.2	98.1	98.1
ResNet50V2	98.2	98.3	98.2	98.2
EfficientNetB0	98.5	98.6	98.5	98.6

Table 3 Comparison of accuracy performance between the proposed method in this research and previous research

Reference	Proposed Method	Accuracy (%)
(Prakash *et al*., 2022)	VGG16, Vanilla CNN	96.0
(Vania *et al*., 2023)	MobileNetV2 + Transfer Learning	98.2
(Shardy, 2023)	VGG16 + Transfer Learning	97.0
(Noroozi, 2023)	Custom CNN (trained from scratch)	96.5
This work	**CNN + Prewitt Operator**	**98.5**

อภิปรายผลและสรุป

การทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้โมเดล CNN เพียงอย่างเดียวกับการใช้โมเดล CNN ร่วมกับ Prewitt Operator ที่ได้รับการปรับแต่งค่าโดยงานวิจัยนี้ พบความแตกต่างที่สำคัญในด้านประสิทธิภาพการจำแนกภาพเมล็ดข้าว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ CNN เพียงอย่างเดียว โมเดลสามารถจำแนกสายพันธุ์ข้าวได้โดยโมเดล EfficientNetB0 มีความแม่นยำสูงสุดที่ 96.8% ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดี แต่ยังมีความคลาดเคลื่อนในการจำแนกบางสายพันธุ์ เนื่องจากขาดการตรวจจับขอบที่ชัดเจน ทำให้โมเดลไม่สามารถแยกแยะรายละเอียดของเมล็ดข้าวที่มีความคล้ายคลึงกันได้อย่างแม่นยำเท่าที่ควร

ในทางตรงกันข้าม การใช้ CNN ร่วมกับ Prewitt Operator ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในโมเดล EfficientNetB0 ที่มีค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 98.5% การตรวจจับขอบด้วย Prewitt Operator ช่วยดึงลักษณะสำคัญของเมล็ดข้าวออกมา เช่น ขอบ, ปลายเมล็ด และร่องลึกบนผิวของเมล็ด ซึ่งช่วยให้โมเดลสามารถแยกแยะความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างสายพันธุ์ได้ดียิ่งขึ้น ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่รวม Prewitt Operator มีค่า Precision, Recall, และ F1-Score สูงขึ้นในทุกตัวชี้วัด โดยเฉพาะใน ResNet50V2 ที่มีค่า F1-Score สูงถึง 98.2% แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ใช้ Prewitt Operator สามารถรักษาความสมดุลในการทำนายได้ดีกว่า กล่าวโดยสรุปการใช้ Prewitt Operator ร่วมกับ CNN ทำให้ประสิทธิภาพการจำแนกภาพเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตรวจจับขอบช่วยเสริมการทำงานของโมเดล CNN ในการดึงลักษณะสำคัญจากภาพ ส่งผลให้การจำแนกทำได้แม่นยำขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ CNN เพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์ของการจำแนกเมล็ดข้าวของงานวิจัยนี้โดยใช้ CNN + Prewitt Operator มีความแม่นยำสูงถึง 98.5% ซึ่งสูงกว่าจากผลการ

ทดลองพบว่า โมเดล CNN ที่รวมเทคนิค Prewitt Operator ซึ่งได้รับการปรับแต่งเฉพาะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกสายพันธุ์ข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในโมเดล EfficientNetB0 ซึ่งได้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) สูงถึง 98.5% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า 4 ฉบับที่ใช้ชุดข้อมูล Rice Image Dataset เดียวกัน พบว่าผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการจำแนกที่โดดเด่นยิ่งกว่า

งานของ Prakash และคณะ (Prakash *et al*., 2022) ใช้โมเดล VGG16 และ CNN พื้นฐานในการจำแนกเมล็ดข้าว โดยไม่มีการปรับแต่ง preprocessing พิเศษ ผลลัพธ์ให้ค่าความแม่นยำอยู่ที่ประมาณ 96.0% ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยนี้อย่างชัดเจน งานของ Shardy (Shardy, 2023) ได้ประยุกต์ใช้ VGG16 ร่วมกับ Transfer Learning จาก ImageNet ซึ่งช่วยให้โมเดลเรียนรู้ได้รวดเร็วขึ้นและได้ค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 97.0% อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการประยุกต์ edge detection ในการเสริมประสิทธิภาพเชิงคุณลักษณะ

ในขณะเดียวกัน งานวิจัยของ Noroozi (Noroozi, 2023) ใช้โมเดล CNN ที่ออกแบบเองและฝึกจากศูนย์ (from scratch) บนชุดข้อมูลเดียวกัน โดยไม่ได้ใช้ Transfer Learning หรือการประมวลผลภาพล่วงหน้าแบบ edge detection ส่งผลให้ค่าความแม่นยำอยู่ในระดับประมาณ 96.5% ซึ่งยังคงต่ำกว่างานวิจัยนี้เล็กน้อย แม้งานวิจัยของ Noroozi จะมีความยืดหยุ่นในการออกแบบโมเดล แต่การขาด preprocessing เชิงลึกส่งผลต่อการแยกแยะเมล็ดข้าวที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

สำหรับงานที่ใช้ MobileNetV2 ร่วมกับ Transfer Learning (Vania *et al*., 2023) ซึ่งให้ค่าความแม่นยำประมาณ 98.2% แม้ว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ แต่ยังไม่ถึงระดับ 98.5% ที่ได้จากการรวม Prewitt Operator ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การตรวจจับขอบอย่างเหมาะสมสามารถเสริมประสิทธิภาพของ CNN ได้ แม้จะไม่ใช้สถาปัตยกรรมที่ล้ำหน้าหรือพึ่งพาโมเดลภายนอก

การใช้ Prewitt Operator ในงานวิจัยของเราช่วยเพิ่มความละเอียดในการตรวจจับขอบของเมล็ดข้าวได้ดีกว่า ทำให้การจำแนกข้าวมีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นจากการเปรียบเทียบการใช้ CNN + Prewitt Operator ในการตรวจจับขอบของเมล็ดข้าวในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงถึงความสามารถในการเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่างานวิจัยที่ใช้วิธีการอื่น ๆ

แม้ว่า Kaggle Rice Image Dataset จะเป็นชุดข้อมูลที่ได้รับการยอมรับและมีโครงสร้างมาตรฐานสำหรับการทดสอบโมเดลจำแนกภาพ แต่ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือการใช้ข้อมูลจากแหล่งเดียว ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมลักษณะของพันธุ์ข้าวไทยทั้งหมดหรือสภาวะแวดล้อมจริงที่พบในกระบวนการผลิตทางการเกษตร ดังนั้น ในอนาคตควรมีการเก็บและทดสอบกับชุดข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะข้อมูลจริงจากแหล่งผลิตในประเทศไทย เพื่อประเมินความสามารถในการปรับใช้ของโมเดลกับพันธุ์ข้าวไทยในบริบทจริง

งานวิจัยในอนาคต สามารถขยายแนวทางที่เสนอไปยังการจำแนกสายพันธุ์ข้าวในสภาวะแสงที่หลากหลาย หรือจากภาพถ่ายภาคสนามจริงที่มีสภาพแวดล้อมไม่แน่นอน เช่น พื้นหลังซับซ้อนหรือแสงธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงได้ อีกทั้งยังสามารถนำเทคนิคที่พัฒนาไปประยุกต์ใช้กับพันธุ์ข้าวไทยท้องถิ่นหรือผลิตภัณฑ์เกษตรอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น เมล็ดถั่วหรือธัญพืชอื่น ๆ เพื่อประเมินความสามารถในการปรับใช้ในบริบทที่กว้างขึ้นได้ และจะนำโมเดลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ใช้สำหรับจำแนกพันธุ์ข้าวไทยด้วยวิธี Transfer Learning

เอกสารอ้างอิง

Ali, H., Ahmed, S., & Khan, M. (2021). Edge detection using Prewitt operator in medical imaging. *International Journal of Biomedical Imaging*.

Arunsiriwattana, P., Kiatwuthiamorn, J., & Cumpim, C. (2021). Laser pointer control for deep learning human detection. *J Sci Technol MSU*, *41*(3).

Chatnuntawech, I., Tantisantisom, K., Khanchaitit, P., Boonkoom, T., & Bilgic, B. (2018). *Rice classification using spatio-spectral deep convolutional neural network*. arXiv. https://arxiv.org/abs/1805.11491

Chen, P., Liu, Q., & Zhang, H. (2020). Traffic sign recognition using edge detection techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

Gayathri Devi, N., & Siddappa, M. (2017). Machine vision approach for quality evaluation of rice grains using CNN. *International Journal of Computer Applications*, *160*, 26–29.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Identity mappings in deep residual networks. In *European conference on computer vision* (pp. 630–645). https://arxiv.org/abs/1603.05027

Jiang, Y., Chen, L., & Xu, Z. (2022). Prewitt operator in plant disease detection. *Journal of Agricultural Science and Technology*.

Kolkure, P. D., & Shaikh, S. S. (2017). Quality analysis of rice grains using CNN based image processing.

In *International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*.

Kongchai, P. (2023). Creating a deep learning model for classifying conversation messages from a LINE application. *J Sci Technol MSU*, *43*(1).

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *25*.

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, *521*(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Martinez, R., Lopez, J., & Sanchez, A. (2023). Remote sensing image analysis using Prewitt edge detection. *Remote Sensing Letters*.

Mousavirad, S. J., & Minaei, S. (2012). Identification of rice varieties using backpropagation neural network. *Journal of Agricultural Engineering*, *39*(1), 49–56.

Nguyen, T., Tran, V., & Hoang, D. (2021). Prewitt operator for facial recognition. *Pattern Recognition and Image Analysis*.

Noroozi, M. (2023). *Rice classification by using CNN*. Kaggle. https://www.kaggle.com/code/marya-mnoroozi68/rice-classification-by-using-cnn

Prakash, N., Rajakumar, R., & Gowthami, K. (2022). Image classification for rice varieties using deep learning models. *YMER Digital*, *21*(6), 263–266.

Prewitt, J. M. S. (1970). Object enhancement and extraction. In *Picture processing and psychopictorics* (pp. 75–149).

Raj, M., Verma, P., & Singh, S. (2023). Prewitt edge detection in agricultural robotics. *Journal of Agricultural Engineering Research*.

Rattanapoka, C. (2024). A real-time analysis of human face emotions using deep learning techniques on low-cost embedded device. *The Journal of KMUTNB*, *34*(2), 1–12.

Senawong, N., Wichitchan, S., & Kumphon, O. (2022). Large-scale data classification based on K-means clustering and deep learning. *The Journal of KMUTNB*, *32*(4), 957–965.

Shardy. (2023). *Rice image classification using VGG16 and transfer learning*. GitHub. https://github.com/Shardy2907/CNN-using-Transfer-Learning

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Sriwiboon, N. (2021). Improvement the performance of the chest X-ray image classification with convolutional neural network model by using image augmentations technique for COVID-19 diagnosis. *The Journal of KMUTNB*, *31*(1), 109–117.

Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the Inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*.

Tan, M., & Le, Q. V. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International Conference on Machine Learning (ICML)*.

Vania, V., Setyadi, A., Widyatama, I. M. D., & Kurniadi, F. I. (2023). Rice varieties classification using neural network and transfer learning with MobileNetV2. In *2023 4th International Conference on Artificial Intelligence and Data Sciences (AiDAS)*.

Wang, X., Zhang, Y., & Li, F. (2019). Prewitt edge detection for OCR in digital documents. *Journal of Computer Vision and Image Processing*.

Zareiforoush, H., Minaei, S., Alizadeh, M. R., & Banakar, A. (2016). Qualitative classification of milled rice grains using computer vision and metaheuristic techniques. *Journal of Food Engineering*, *195*, 1–9.

การเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกโดยใช้วิธีเบส์เซียนและวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน

A comparison of independent variable selection in a logistic regression model using Bayesian variable selection and stepwise regression

กานต์ณัฐ ณ บางช้าง[1*], ภัทรภร ศรีสด[1] , เมธาพร สารศรี[1] และภูริภัทร สุขสี[1]

Kannat Na Bangchang[1*], Phattharaphon Srisod[1], Methapohn Sarasri[1] and Phuripat Suksee[1]

Received: 19 February 2025 ; **Revised:** 8 May 2025 ; **Accepted:** 20 June 2025

บทคัดย่อ

การคัดเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสม จะทำให้ตัวแบบที่ได้มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์การถดถอย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกด้วยวิธีเบส์เซียน (Bayesian Method) โดยใช้วิธีการสุ่มแบบกิบส์ (Gibbs Sampling) กับวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) และทำการเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบ ทั้งในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมาก ศึกษาโดยการจำลองข้อมูลและประยุกต์ใช้กับข้อมูลลักษณะพฤติกรรมการเขียนออนไลน์เพื่อวินิจฉัยการเป็นโรคอัลไซเมอร์ ในการจำลองข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัยนี้กำหนดขนาดตัวอย่างเท่ากับ 25 และ 100 โดยกระทำซ้ำ 100 ครั้งในแต่ละกรณี และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการสุ่มแบบกิบส์และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยเกณฑ์พิจารณา คือ คำนวณค่าเกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (AIC) , ค่าเกณฑ์สารสนเทศของของเบส์ (BIC) จำนวนแปรอิสระที่ถูกต้องค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยและร้อยละความถูกต้อง ผลศึกษาพบว่าทั้งกรณีตัวอย่างขนาดเล็ก (n = 25) และตัวอย่างขนาดใหญ่ (n = 100) กรณีที่ข้อมูลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมาก วิธีการสุ่มแบบกิบส์และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบไม่แตกต่างกัน แต่ในกรณีที่ข้อมูลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับสูงมาก วิธีการสุ่มแบบกิบส์มีประสิทธิภาพในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบดีกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยสามารถนำวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงที่ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุได้

คำสำคัญ การถดถอยลอจิสติก, ความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ , วิธีการคัดเลือกตัวแปรโดยใช้วิธีเบส์เซียน, วิธีการถดถอยแบบขั้นตอน, วิธีการสุ่มแบบกิบส์

Abstract

Selecting appropriate independent variables yields a highly efficient model, particularly in regression analysis. This study aims to examine the selection of independent variables in a logistic regression model using Bayesian variable selection via Gibbs sampling and stepwise regression. It compares these two selection methods under conditions of very low and very high multicollinearity among independent variables. The study is conducted through data simulation and applied to online writing behavior data for diagnosing Alzheimer's disease. The sample sizes for the simulation were set to 25 and 100, with 100 replications for each case. The performances of Gibbs sampling and stepwise regression were compared based on evaluation criteria, including the Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC), number of correctly selected independent variables, average estimated coefficients of

[1] สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[1] Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

* Corresponding author; E-mail: kannat@mathstat.sci.tu.ac.th

correctly selected variables, and accuracy percentage. The results indicate that for both small (n = 25) and large (n = 100) sample sizes, when the multicollinearity among independent variables is very low, Gibbs sampling and stepwise regression show no significant difference in their efficiency in selecting independent variables. However, in cases where multicollinearity is very high, Gibbs sampling demonstrates superior performance in selecting independent variables compared to stepwise regression. The findings of this research can be applied to select independent variables in real-world data exhibiting multicollinearity.

Keywords: Logistic regression, multicollinearity, Bayesian variable selection, stepwise regression, Gibbs sampling

บทนำ

การวิเคราะห์การถดถอยลอจิสติกทวินาม (Binary Logistic Regression Analysis) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปรเชิงพหุที่มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าหรือทำนายเหตุการณ์ที่สนใจว่าจะเกิดหรือไม่เกิดเหตุการณ์นั้นภายใต้อิทธิพลของตัวแปรอิสระ โดยตัวแบบประกอบด้วยตัวแปรตามที่เป็นตัวแปรแบบทวินาม คือ มีได้สองค่า เช่น “ใช่” กับ “ไม่ใช่” เป็นต้น ซึ่งอาจจะมีตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องทั้งแบบตัวเดียวหรือหลายตัว ที่เป็นไปได้ทั้งตัวแปรเชิงกลุ่มหรือตัวแปรแบบต่อเนื่อง (ภัคสุภางค์ มาปรีดา, 2560)

การคัดเลือกตัวแปรเป็นกระบวนการหนึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิติ และมีความจำเป็นต่องานวิจัย ช่วยให้นักวิจัยได้ค้นหาปัจจัยที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อเรื่องที่นักวิจัยสนใจ (พจนา แววสวัสดิ์, 2547) ดังนั้นการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาตัวแบบให้มีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องในการทำนายตัวแปรตาม อีกทั้งยังลดความซับซ้อน ทรัพยากร และเวลาในการวิเคราะห์การถดถอย เนื่องจากการที่ตัวแบบมีตัวแปรอิสระมาก ไม่ได้หมายความว่าตัวแปรอิสระจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูง อาจทำให้เกิดปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระ (Multicollinearity) และถ้าตัวแบบมีตัวแปรอิสระที่น้อยเกินไปก็อาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการทำนายตัวแปรตาม ดังนั้นตัวแบบการถดถอยลอจิสติกจะต้องประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์เฉพาะกับตัวแปรตาม และทำให้มีค่าประมาณความเอนเอียงน้อยที่สุด (ธนธัญ เกิดผล, 2559)

เทคนิคการคัดเลือกตัวแปรอิสระมีหลายวิธี เช่น วิธีการคัดเลือกตัวแปรแบบดั้งเดิม ประกอบไปด้วย วิธีนำตัวแปรเข้าทั้งหมด (Enter Regression) วิธีเพิ่มตัวแปร (Forward Selection) วิธีลดตัวแปร (Backward Elimination) และ วิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) เป็นต้น โดยเทคนิควิธีการข้างต้นใช้แนวคิดการหาค่าประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (OLS) ซึ่งจะทำได้ก็ต่อเมื่อข้อมูลมีจำนวนตัวแปรอิสระน้อยกว่าขนาดตัวอย่าง แต่เมื่อข้อมูลมีจำนวนตัวแปรอิสระมากกว่าขนาดตัวอย่าง จะไม่สามารถประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้ เนื่องจากเมทริกซ์จัตุรัส (X’X) จะเป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix) ทำให้ไม่สามารถหาเมทริกซ์ผกผัน (Inverse Matrix) ได้ นอกจากนี้ค่าประมาณที่ได้จะไม่เสถียรและไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ (Multicollinearity) อีกทั้งตัวแบบที่ได้จะมีจำนวนตัวแปรอิสระสูง จึงทำให้มีความซับซ้อนและอธิบายความสัมพันธ์ได้ยาก (Müller *et al*., 2013) ดังนั้นกรณีที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าขนาดตัวอย่าง วิธีคัดเลือกตัวแปรข้างต้นอาจจะยังไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีเบส์เซียน (Bayesian Variable Selection) ซึ่งใช้วิธีการสุ่มแบบกิบส์ (Gibbs Sampling) เนื่องจากสนใจหลักการของเบส์เพื่อให้ได้ตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลโดยงานวิจัยนี้จะทำการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกทวินาม (Binary Logistics Regression) ด้วยวิธีของเบส์เซียน (Bayesian Variable Selection) โดยใช้วิธีการสุ่มแบบกิบส์ (Gibbs Sampling) กับวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบโดยจำลองข้อมูล ซึ่งกำหนดจำนวนตัวแปรอิสระในตัวแบบเต็มรูป (Full Model) เท่ากับ 200 ตัวแปร กำหนดจำนวนตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม 10 ตัวแปร คือ เป็นตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเท่ากับ 2 และขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 25 และ 100 ตามลำดับ เพื่อให้ครอบคลุมทั้งกรณีที่ตัวแปรอิสระมากกว่าขนาดตัวอย่าง และขนาดตัวอย่างมากกว่าตัวแปรอิสระ โดยกระทำซ้ำ 100 ครั้งในแต่ละกรณี ทั้งกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมาก

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกด้วยวิธีเบส์เซียนโดยใช้วิธีการสุ่มแบบกิบส์กับวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน และเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบทั้งในกรณีไม่มีและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ

วิธีการดำเนินวิจัย

1. แผนการดำเนินงานวิจัย

1.1 กำหนดตัวแบบแท้จริงโดยใช้ตัวแปรอิสระจำนวน 10 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามซึ่งตัวแบบเต็มรูปมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 200 ตัวแปร โดยเริ่มกำหนดความคลาดเคลื่อนสุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน โดยที่ e ~ $Logistic\ (0,1)$ ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรอิสระมีการแจกแจงดังนี้

$$x_i \sim \mathrm{N}(\mathbf{0}_{p\times 1}, \Sigma_{p\times p}(\rho)) \quad (1)$$

1.2 การสุ่มข้อมูลของตัวแปรอิสระในแต่ละกรณี

กรณีที่ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ ทำการสุ่มข้อมูลของตัวแปรอิสระ ทั้งกรณีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 25 และ 100 ตามลำดับ

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ ทำการสุ่มข้อมูลของตัวแปรอิสระ ทั้งกรณีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 25 และ 100 ตามลำดับ และสร้างตัวอิสระบางตัวให้มีความสัมพันธ์กัน (ประพันธ์ กล่อมพร, 2560) โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระ x_1 กับ x_2 และตัวแปรอิสระ x_{11} กับ x_{12} ความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุในระดับสูงมาก $(\mathrm{r} \geq 0.91)$

1.3 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_j ที่ไม่เท่ากับ 0 จำนวน 10 ตัว โดยให้มีค่า เป็น 2 เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของตัวแปรอิสระนั้นที่มีต่อตัวแปรตาม ดังนี้

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{14} = \beta_{15} = 2$$

และกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถดถอยที่เหลือมีค่าเป็น 0

1.4 จำลองตัวแปรตาม (y) ให้มีค่าเป็น 0 กับ 1 โดยใช้ Latent Variable Model (Polson *et al*., 2013)

$$y = \begin{cases} 0 \text{ เมื่อ } \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_p x_p + \varepsilon \leq 0 \\ 1 \text{ เมื่อ } \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_p x_p + \varepsilon > 0 \end{cases}$$

โดยที่ $\varepsilon \sim Logistic\ (0,1)$ (2)

ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันภายใต้ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกแบบ 2 กลุ่ม (Binary Logistic Regression) ซึ่งเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\mathrm{P_y} = \frac{e^{\beta_0+\beta_1 x_1+\cdots+\beta_p x_p}}{1+e^{\beta_0+\beta_1 x_1+\cdots+\beta_p x_p}} \quad (3)$$

โดยที่ P_y คือ ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ

1.5 ทำการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ 2 วิธี คือวิธีการสุ่มแบบกิบส์ และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน

1.6 คำนวณค่า AIC ค่า BIC จากนั้นพิจารณาจำนวนแปรอิสระที่ถูกต้อง ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ย และร้อยละความถูกต้องของตัวแบบที่ได้จากการคัดเลือกตัวแปรอิสระทั้ง 2 วิธี

1.7 ทำการจำลองข้อมูลซ้ำในแต่ละกรณีจำนวน 100 รอบ

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ขั้นตอนการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) (Arkes, 2023)

2.1.1 การคัดเลือกตัวแปรแบบนำเข้า (Forward Stepwise Selection) โดยใช้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

กระบวนการนี้เริ่มต้นโดยไม่มีตัวแปรอิสระใด ๆ อยู่ในตัวแบบ จากนั้นจึงทดสอบนำตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเข้าในตัวแบบทีละตัว โดยพิจารณาตัวแปรที่สามารถลดค่า -2 Log-Likelihood (-2LL) ได้มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ตัวแปรที่ถูกเลือกเข้ามานี้จะต้องมีคุณสมบัติในการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้ดีขึ้น กระบวนการดังกล่าวจะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีตัวแปรใด ๆ ที่สามารถลดค่า -2LL ได้อย่างมีนัยสำคัญเพิ่มเติม

2.1.2 การคัดเลือกตัวแปรแบบคัดออก (Backward Stepwise Selection) โดยใช้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 กระบวนการนี้เริ่มต้นโดยการนำตัวแปรอิสระทั้งหมดเข้าสู่ตัวแบบ จากนั้นจึงทดสอบการคัดเลือกตัวแปรที่ควรถูกนำออก โดยพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า -2LL น้อยที่สุดเมื่อนำออก หากการนำตัวแปรใดออกส่งผลให้ค่า -2LL ลดลงเล็กน้อยหรือไม่มีนัยสำคัญ ตัวแปรนั้นจะถูกตัดออกจากตัวแบบ กระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าจะเหลือตัวแปรเฉพาะที่มีนัยสำคัญในการอธิบายตัวแปรตามและทำให้ค่า -2LL ต่ำที่สุด

2.1.3 การทำซ้ำคัดเลือกตัวแปรแบบนำเข้าและคัดออก ทั้งสองวิธีดังกล่าวใช้กระบวนการทำซ้ำในการปรับปรุงตัวแบบ พิจารณาตัวแปรที่เพิ่มและลบเข้าออกจากตัวแบบอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดค่า -2LL ให้ต่ำที่สุด การทำซ้ำนี้จะหยุดเมื่อไม่มีตัวแปรใด ๆ ที่สามารถลดค่า -2LL ได้เพิ่มเติมอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ได้ตัวแบบที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 ขั้นตอนการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีของเบส์ โดยการสุ่มแบบกิบส์ (Tian *et al.*, 2019)

2.2.1 การหาตัวแปรตาม Y จำเป็นต้องทราบความน่าจะเป็นก่อน (Prior) ของ β และ $\boldsymbol{\tau}$ ซึ่งต้องกำหนดความน่าจะเป็นก่อนของ γ เพื่อใช้สำหรับการคัดเลือกตัวแปร และจึงจะสามารถกำหนดความน่าจะเป็นของ β และ $\boldsymbol{\tau}$ ได้สมการ ดังนี้

$$\beta_i|\gamma_i \sim (1-\gamma_i)N(0,\tau) + \gamma_i N(0,\tau)$$

กำหนดการแจกแจงความน่าจะเป็นก่อนของ g

$$\gamma \sim \text{Ber}(p_i)\,;\ i = 1,2,\ldots,k \qquad (5)$$

โดยให้ $\gamma = [\gamma_1, \ldots, \gamma_j, \ldots . \gamma_p]^T$

เมื่อ γ_j เป็นตัวแปรที่ใช้เป็นตัวบ่งบอกว่าตัวแปรอิสระที่ j อยู่ในตัวแบบการถดถอยลอจิสติกหรือไม่ โดยที่

$\gamma_j = 1$ เมื่อตัวแปรอิสระตัวที่ j อยู่ในตัวแบบการถดถอยลอจิสติก

$\gamma_j = 0$ เมื่อตัวแปรอิสระตัวที่ j ไม่อยู่ในตัวแบบการถดถอยลอจิสติก

กำหนดการแจกแจงก่อนของ β ให้มีการแจกแจงแบบปรกติโดยมีเงื่อนไขอยู่บน τ, y, γ

$$\beta\,|\,\tau, y, \gamma \sim N\left(\Sigma(\tau)\left(x_\gamma'\left(y-\tfrac{1}{2}1_n\right)\right), \left(x_\gamma'\tau x_\gamma + \tau^{-1}\right)^{-1}\right) \qquad (6)$$

กำหนดการแจกแจงก่อนของ $\boldsymbol{\tau}$ ที่มีการแจกแจงแกมมา (Gamma distribution) ดังนี้

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \tau_p \end{bmatrix}$$

$$\tau_j\,|\,\lambda, d, \gamma \sim \text{Gamma}\left(\frac{3}{p}, \frac{1}{d^2}\right) \qquad (7)$$

2.2.2 ใช้การสุ่มแบบกิบส์*เริ่มต้นการสุ่มแบบกิบส์โดยสร้างการสุ่มของ γ แล้วจึงสร้างลำดับการสุ่มเป็นดังนี้*

$$\gamma^0, \beta^0, \tau^0, \gamma^1, \beta^1, \tau^1, \ldots \gamma^j, \beta^j, \tau^j$$

ซึ่งจะได้ค่าออกมาทีละตัวตามลำดับ หลังจากนั้นคำนวณความน่าจะเป็นภายหลังของ γ ที่มีความน่าจะเป็นหลังสูงสุดเข้าสู่ตัวแบบเป็นอันดับแรก และมีค่าสูงรองลงมาเข้าสู่ตัวแบบ ตามลำดับ

3. เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

3.1 เกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะถูกนำเสนอโดย Akaike (1978) เพื่อคัดเลือกตัวแบบที่ให้ค่าพยากรณ์แม่นยำที่สุด พิจารณาจากการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนรวมกับข้อสนเทศ(Information) ของค่าสังเกตและใช้แนวคิดจากการหาค่าต่ำสุดของข้อสนเทศด้วยหลักการคูลส์เบล็ค-ไลท์เบอร์ (Kullback-Leibler Information) ข้อตกลงเบื้องต้นคือตัวประมาณของสัมประสิทธิ์การถดถอยได้มาจากวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด และยังเป็นการคัดเลือกตัวแบบที่เหมาะสมภายใต้ตัวแบบที่มีการใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน แต่มีจำนวนตัวแปรอิสระที่แตกต่างกันใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระชุดหนึ่ง ตัวแบบที่เหมาะสมกว่าจะมีค่า AIC ต่ำกว่า โดยมีสูตรดังนี้

$$\text{AIC} = -2(\log \text{likelihood}) + 2p \qquad (8)$$

โดยที่ log = ลอการิทึมธรรมชาติ (ln)

likelihood = ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Function)

p = จำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกเลือกเข้าตัวแบบ

3.2 เกณฑ์ข้อสนเทศของเบส์ (BIC) ถูกนำเสนอโดยซาวา (Sawa, 1978) โดยพัฒนามาจากเกณฑ์ AIC ทั้งนี้เกณฑ์ BIC จะเลือกตัวแบบที่ให้ค่า BIC ต่ำที่สุดเป็นตัวแบบที่ถูกต้อง

$$\text{BIC} = -2(\log \text{likelihood}) + p \cdot \log(n) \qquad (9)$$

โดยที่ log = ลอการิทึมธรรมชาติ (ln)

likelihood = ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Function)

p = จำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกเลือกเข้าตัวแบบ

n = จำนวนขนาดตัวอย่าง

3.3 การนับจำนวนแปรอิสระที่ถูกต้องที่เข้าสู่ตัวแบบ โดยพิจารณาจำนวนตัวแปรอิสระที่คัดเลือกเข้าสู่ตัวแบบได้ตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ได้แก่

$$X_1, X_3, X_4, X_5, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}$$

เช่น ภายในตัวแบบคัดเลือกตัวแปรอิสระมาทั้งหมด 5 ตัวแปร ได้แก่ $X_1, X_4, X_7, X_{10}, X_{11}$ จะนับจำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้อง (ส่งผลต่อตัวแปรตาม) ได้ 3 ตัวแปร เป็นต้น

3.4 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ย

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ประมาณได้ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อแสดงความสำคัญของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตาม ตัวอย่างเช่น หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิของตัวแปร $X_1, X_4, X_8, X_{11}, X_{20}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 49.567, 17.753, 98.665, 84.467, 46.643 และ78.123 ตามลำดับ จะได้ค่าประสิทธิภาพของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ย 50.595

3.5 จำนวนร้อยละความถูกต้อง

กรณีที่ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ จะพิจารณาแค่กรณีเดียว คือ เมื่อตัวแบบเลือกตัวแปรอิสระ ได้แก่

$$\overline{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}}$$

เข้าสู่ตัวแบบอย่างน้อยหนึ่งตัวแปร จึงจะถือว่าคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบได้อย่างถูกต้อง

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระ จะพิจารณาตัวแบบที่เลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบอย่างน้อยหนึ่งตัวแปร โดยที่ตัวแบบไม่เลือกตัวแปรอิสระ $x_1 x_1 \sqrt{x_1}$ กับ $x_2 x_2 \sqrt{x_2}$ และตัวแปรอิสระ $x_{11} x_{11} \sqrt{x_{11}}$ กับ $x_{12} x_{12} \sqrt{x_{12}}$ เข้าสู่ตัวแบบพร้อมกัน เนื่องจากตัวแปรอิสระข้างต้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุในระดับสูงมาก จึงจะถือว่าคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบได้อย่างถูกต้อง

4. ขั้นตอนนำไปใช้กับข้อมูลจริง

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลลักษณะพฤติกรรมการเขียนออนไลน์เพื่อวินิจฉัยการเป็นโรคอัลไซเมอร์ (Cilia *et al.*, 2022) ศึกษาจากผู้เข้าร่วมทดสอบจำนวน 174 ราย ในประเทศอิตาลี ปี ค.ศ. 2022 โดยมีตัวแปรตามมี 1 ตัวแปร ที่มีค่าได้ 2 ค่า คือ การเป็นโรคอัลไซเมอร์ (y) โดยกำหนด y = 1 แทนเป็นโรคอัลไซเมอร์ มีผู้เข้าร่วมทดสอบทั้งหมดจำนวน 89 ราย และ y = 0 แทนไม่เป็นโรคอัลไซเมอร์ $(y = 1)$ มีผู้เข้าร่วมทดสอบทั้งหมดจำนวน 85 ราย

ตัวแปรอิสระจำนวน 450 ตัวแปร คือ ลักษณะพฤติกรรมการเขียนออนไลน์ เช่น เวลาที่ปากกาอยู่ในอากาศ, ดัชนีการกระจายของลายมือ, อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของปากกาเมื่ออยู่ในอากาศระหว่างการเขียน, อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการเคลื่อนที่ของปากกาเมื่อสัมผัสกับกระดาษระหว่างการเขียน ,ค่าเฉลี่ยของแรงกดปากกา, ค่าเฉลี่ยของมุมกดปากกา เป็นต้น

แบ่งข้อมูลจริงของตัวแปรอิสระออกเป็น 2 กรณี

4.1 กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับที่ต่ำมาก

4.1.1 การปรับมาตรฐานข้อมูล

การปรับมาตรฐานข้อมูลเป็นการปรับค่าของข้อมูลให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบตัวแปรที่มีหน่วยวัดต่างกันได้ (บุญชม ศรีสะอาด, 2556) โดยคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (10)$$

โดย z_i คือ ค่าที่ได้หลังจากการปรับมาตรฐานข้อมูล

x_i คือ ค่าของข้อมูลแต่ละตัว

μ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

4.1.2 คัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่อกันในระดับที่ต่ำมาก ($r \leq 0.01 r \leq 0.01$)

คัดเลือกเฉพาะตัวแปรอิสระคู่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.01 โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นเป็นการวัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรสองตัวซึ่งคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

โดย r_{xy} คือ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y (correlation)

x_i คือ ค่าข้อมูลในแต่ละจุดของตัวแปร X

y_i คือ ค่าข้อมูลในแต่ละจุดของตัวแปร Y

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร X

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร Y

4.2 กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับสูงมาก นำข้อมูลของตัวแปรอิสระจากกลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์และกลุ่มที่ไม่มีผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์มาใช้ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระ โดยไม่มีการปรับข้อมูล เนื่องจากชุดข้อมูลนี้มีจำนวนตัวแปรอิสระจำนวนมากที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับที่สูงมาก

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนำเสนอโดยใช้รูปแบบตารางซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีหลัก คือ กรณีที่มีขนาดตัวอย่าง (n) เท่ากับ 25 และ

100 และแบ่งพิจารณาตามความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระเพิ่มเติมเป็น 2 กรณีย่อย คือ กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับที่ต่ำมากและกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับที่สูงมาก โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระ X_1 กับ X_2 และ X_{11} กับ X_{12} มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุในระดับสูงมาก โดยใช้วิธี Cholesky Decomposition (ประพันธ์ กล่อมพร, 2560) โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ X_1 กับ X_2 และ X_{11} กับ X_{12} มีค่าตั้งแต่ 0.91 ขึ้นไป เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบของทั้งสองวิธีสำหรับในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมาก โดยใช้เกณฑ์สารสนเทศของอะกะอิเกะ (AIC) เกณฑ์สารสนเทศของของเบส์ (BIC) จำนวนร้อยละความถูกต้องของการคัดเลือกตัวแปรอิสระ จำนวนตัวแปรอิสระที่เลือกถูกต้อง และค่าประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยเฉลี่ย

ผลการวิจัย

กรณีข้อมูลจากการจำลอง

กรณีนี้นำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลจากการจำลอง โดยเปรียบเทียบค่าร้อยละความถูกต้องของการคัดเลือกตัวแปรอิสระระหว่างวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนและวิธีการคัดเลือกตัวแปรโดยใช้วิธีเบส์เซียน โดยการสุ่มแบบกิบส์ ในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมาก โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวอย่างขนาดเล็กและตัวอย่างขนาดใหญ่ แสดงดังใน Table 1

Table 1 The comparison of AIC, BIC, the number of correctly selected independent variables, the percentage of correctly selected variables, and the average estimated coefficients for small sample sizes (n = 25) and large sample sizes (n = 100)

n	Correlation coefficient	Method	AIC	BIC	The average number of correctly selected variables	The average estimated coefficients	The percentage of correctly selected variables
25	0.01	Stepwise	12.42	20.04	4.19	306.21	99
		Gibbs	50.00	80.47	8.83	5.51	100
	r >= 0.91	Stepwise	11.18	17.99	4.29	338.63	3
		Gibbs	47.60	76.60	8.96	3.91	17
100	0.01	Stepwise	42.93	99.48	4.19	354.52	100
		Gibbs	190.86	408.67	8.83	8.35	100
	r >= 0.91	Stepwise	34	73.94	4.29	572.96	15
		Gibbs	171.87	368.78	8.96	6.87	93

ส่วนที่ 1 สำหรับข้อมูลขนาดเล็ก

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมาก ผลจาก Table 1 พบว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 50.00 และ 80.47 ตามลำดับ ส่วนค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 12.42 และ 20.40 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์สูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยต่างกันที่ 37.58 สำหรับค่า AIC และ 60.07 สำหรับค่า BIC

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยสำหรับวิธีการสุ่มแบบกิบส์อยู่ที่ 5.51 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีค่าเฉลี่ยที่ 306.21 ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ คือ 2 โดยมีค่าส่วนต่าง 3.51 และ 304.21 ตามลำดับ

การคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบของวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีความถูกต้องที่ร้อยละ 100 และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีความถูกต้องร้อยละ 99

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับสูงมาก พบว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 47.60 และ 76.60 ตามลำดับ ขณะที่ค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 11.8 และ 17.99 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์ยังคงสูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยแตกต่างกัน 35.8 สำหรับค่า AIC และ 58.61 สำหรับค่า BIC

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยสำหรับวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 3.91 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 338.63 ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ คือ 2 โดยมีค่าส่วนต่าง 1.91 และ 336.63 ตามลำดับ

การคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบของวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีความถูกต้องร้อยละ 3 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีความถูกต้องร้อยละ 17

ส่วนที่ 2 สำหรับข้อมูลขนาดใหญ่

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมาก ผลจาก Table 1 พบว่า ค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 190.86 และ 408.67 ตามลำดับ ส่วนค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 42.93 และ 99.48 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์สูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยต่างกันที่ 147.93 สำหรับค่า AIC และ 309.19 สำหรับค่า BIC

วิธีการสุ่มแบบกิบส์มีจำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องในตัวแบบเท่ากับ 8.83 ขณะที่วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีจำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องเท่ากับ 4.19 โดยวิธีการสุ่มแบบกิบส์ให้จำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องมากกว่า 4.64

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยสำหรับวิธีการสุ่มแบบกิบส์อยู่ที่ 8.35 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีค่าเฉลี่ยที่ 354.52 ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ คือ 2 โดยมีค่าส่วนต่าง 6.35 และ 352.52 ตามลำดับ

การคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบของทั้งสองวิธีมีความถูกต้องที่ร้อยละ 100

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับสูงมาก พบว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 171.87 และ 368.78 ตามลำดับ ขณะที่ค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 34 และ 73.94 แสดงให้เห็นว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์ยังคงสูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยแตกต่างกัน 137.87 สำหรับค่า AIC และ 294.84 สำหรับค่า BIC

วิธีการสุ่มแบบกิบส์ให้จำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องในตัวแบบเท่ากับ 8.96 ขณะที่วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนให้ค่าเท่ากับ 4.29 โดยวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีจำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องมากกว่า 4.67

ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระที่ถูกต้องโดยเฉลี่ยสำหรับวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 6.87 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 572.96 ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ คือ 2 โดยมีค่าส่วนต่าง 4.87 และ 570.96 ตามลำดับ

การคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบของวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีความถูกต้องร้อยละ 93 ส่วนวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีความถูกต้องร้อยละ 15

กรณีข้อมูลจริง

ในกรณีนี้ได้ศึกษาโดยใช้ข้อมูลจริงโดยแบ่งออกเป็นคัดเลือกตัวแปรโดยใช้วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนและวิธีเบส์เซียน โดยการสุ่มแบบกิบส์ ในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในรดับต่ำมากและสูงมาก ดังแสดงใน Table 2

Table 2 The comparison of AIC, BIC, and the accuracy of independent variable selection for the real dataset.

Correlation coefficient	Method	AIC	BIC
0.01	Stepwise	60.00	154.77
	Gibbs	190.00	490.11
r >= 0.91	Stepwise	316.00	815.13
	Gibbs	344.00	887.35

กรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมาก ผลจาก Table 2 พบว่า ค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 190.00 และ 490.11 ตามลำดับ ส่วนค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 60.00 และ 154.77 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์สูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน โดยต่างกันที่ 130.00 สำหรับค่า AIC และ 335.34 สำหรับค่า BIC

ในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับสูงมาก พบว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์เท่ากับ 344.00 และ 887.35 ตามลำดับ ขณะที่ค่า AIC และ BIC ของวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนเท่ากับ 316.00 และ 887.35 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า AIC และ BIC ของวิธีการสุ่มแบบกิบส์ยังคงสูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคัดเลือกตัวแปรอิสระของทั้งสองวิธีสำหรับแต่ละกรณีโดยใช้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบ คือ เกณฑ์ AIC และ BIC จำนวนร้อยละความถูกต้องของการคัดเลือกตัวแปร จำนวนตัวแปรที่

เลือกถูกต้อง และค่าประมาณสัมประสิทธิ์โดยเฉลี่ย โดยมีการจำลองข้อมูลและทดสอบตัวแบบกับข้อมูลจริง

จากการศึกษาพบว่าทั้งวิธีการสุ่มแบบกิบส์และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมีการปรับขั้นตอนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างเหมาะสมกับข้อมูลที่กำลังวิเคราะห์ โดยการปรับพารามิเตอร์และการตั้งค่าที่เหมาะสมในแต่ละวิธีมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพของตัวแบบ

การเปรียบเทียบค่า AIC และ BIC ในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมากทั้งในขนาดตัวอย่าง 25 และ 100 พบว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมีค่า AIC และ BIC ต่ำกว่าวิธีการสุ่มแบบกิบส์ในทุกกรณี แม้ว่าวิธีการสุ่มแบบกิบส์จะสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ดีและมีความยืดหยุ่นมากกว่า แต่ค่า AIC และ BIC กลับสูงกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่าแม้วิธีการสุ่มแบบกิบส์จะมีความซับซ้อนและมีความยืดหยุ่นในการคัดเลือกตัวแปร แต่วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนยังคงเหมาะสมกว่าในแง่ของความเรียบง่ายของตัวแบบ

การเปรียบเทียบค่าต่าง ๆในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมาก ทั้งวิธีการสุ่มแบบกิบส์และวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนสามารถคัดเลือกตัวแปรอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพได้อย่างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระสูงมาก วิธีการสุ่มแบบกิบส์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยเฉพาะเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่ เนื่องจากวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีความยืดหยุ่นในการเลือกตัวแปรและสามารถรักษาตัวแปรสำคัญไว้ได้มากกว่า ในขณะที่วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมักจะตัดตัวแปรสำคัญออกจากตัวแบบในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์ต่อกันสูง

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรอิสระที่ถูกต้องในตัวแบบระหว่างวิธีการสุ่มแบบกิบส์และการถดถอยแบบขั้นตอน พบว่าวิธีการสุ่มแบบกิบส์สามารถคัดเลือกตัวแปรที่ถูกต้องได้มากกว่าในทุกกรณี โดยเฉพาะเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น แสดงได้ว่าวิธีการสุ่มแบบกิบส์มีความแม่นยำในการคัดเลือกตัวแปรที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการถดถอยแบบขั้นตอน

เมื่อเปรียบเทียบค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระระหว่างวิธีการสุ่มแบบกิบส์และการถดถอยแบบขั้นตอน พบว่า วิธีการสุ่มแบบกิบส์ให้ค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ที่แท้จริงมากกว่าทั้งในกรณีที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระในระดับต่ำมากและสูงมาก รวมถึงในขนาดตัวอย่างที่เท่ากับ 25 และ 100

โดยสรุปแล้ว วิธีการสุ่มแบบกิบส์มีประสิทธิภาพดีกว่าในการจัดการกับปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างตัวแปรอิสระและในการเลือกตัวแปรที่ถูกต้อง โดยเฉพาะเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่ ขณะที่วิธีการถดถอยแบบขั้นตอนยังคงเป็นวิธีที่เหมาะสมเมื่อไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระระหว่างตัวแปรอิสระ เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์ AIC และ BIC

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการขยายขอบเขตการศึกษาและหาตัวแบบที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อาจนำวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธีการสุ่มแบบกิบส์ไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง และนำวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่ใช้ในงานวิจัยไปเปรียบเทียบกับเทคนิคแบบอื่นๆ เช่น การถดถอยแบบแลซโซ่ (Lasso Regression) เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การเปรียบเทียบวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสู่ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกทวินามโดยใช้วิธีเบส์เซียนและวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย รวมทั้งทรัพยากรต่าง ๆ ตลอดจนการเข้าถึงข้อมูลที่จำเป็นในการวิจัย สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะมีส่วนในการพัฒนาและประยุกต์ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระในงานวิเคราะห์เชิงสถิติ ตลอดจนเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในการนำวิธีเบส์เซียนและวิธีการถดถอยแบบขั้นตอนมาใช้ในงานวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

ธนธัญ เกิดผล. (2559). *ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกแลสโซ่ที่อธิบายความสัมพันธ์ของการเป็นหนี้สินและตัวชี้วัดระดับความเข้มแข็งของครัวเรือน* [สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].

บุญชม ศรีสะอาด. (2556). *วิธีการทางสถิติสำหรับการทำวิจัย เล่ม 1* (พิมพ์ครั้งที่ 5). สุวีริยาสาส์น.

ประพันธ์ กล่อมพร. (2560). *ขั้นตอนวิธีกำหนดเมทริกซ์สหสัมพันธ์แรกเริ่มโดยการจำลองสำหรับการแปลงนอร์ทา* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].

พจนา แววสวัสดิ์. (2547). เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับความถดถอยเชิงเส้นตรง. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์*, *4*(1), 5–20.

ภัคสุภางค์ มาปรีดา. (2560). *ตัวแบบการถดถอยลอจิสติกในการพยากรณ์ความน่าจะเป็นของการชำระหนี้ได้ของครัวเรือน: กรณีศึกษา จังหวัดปทุมธานี* [สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].

Akaike, H. (1978). A Bayesian analysis of the minimum AIC procedure. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, *30*(1), 9–14.

Arkes, J. (2023). *Regression analysis: A practical introduction* (2nd ed.). Routledge.

Cilia, M., De Stefano, C., Fontanella, F., & Di Freca, A. S. (2022). Diagnosing Alzheimer's disease from on-line handwriting: A novel dataset and performance benchmarking. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *111*, Article 104822. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104822

Müller, S., Scealy, J. L., & Welsh, A. H. (2013). Model selection in linear mixed models. *Statistical Science*, *28*(2), 135–167.

Polson, N. G., Scott, J. G., & Windle, J. (2013). Bayesian inference for logistic models using Pólya–Gamma latent variables. *Journal of the American Statistical Association*, *108*(504), 1339–1349.

Sawa, T. (1978). Information criteria for discriminating among alternative regression models. *Econometrica*, *46*(6), 1273–1291.

Tian, Y., Bondell, H. D., & Wilson, A. (2019). Bayesian variable selection for logistic regression. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, *12*(5), 378–393.

การจำแนกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบผสมผสาน

Cashew nut size classification using hybrid learning techniques

ภวัต ฉิมเล็ก[1], ธงรบ อักษร[1], เสกสรรค์ ศิวิลัย[1] และสุธาสินี จิตต์อนันต์[2]

Pawat Chimlek[1], Thongrob Auxsorn[1], Sakesan Sivilai[1*] and Sutasinee Jitanan[2]

Received: 28 February 2025 ; **Revised:** 15 May 2025 ; **Accepted:** 1 July 2025

บทคัดย่อ

ที่มาของปัญหาการวิจัยนี้เกิดจากข้อจำกัดของวิธีการคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์แบบดั้งเดิม ซึ่งส่งผลให้มีต้นทุนแรงงานสูงและคุณภาพผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ อันส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ไทยในตลาดโลก วัตถุประสงค์ของการวิจัยคือการพัฒนาระบบคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีความแม่นยำสูงด้วยการผสมผสานเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) และการเรียนรู้ของเครื่อง (machine Learning) วิธีการศึกษาได้นำเสนอระบบการคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์แบบผสมผสาน โดยประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้เทคนิค YOLOv5 ในการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์จากภาพ โดยได้ทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง และใช้การเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้ SVM ในการคัดขนาดซึ่งวิเคราะห์จากลักษณะโครงสร้างหลักที่ชัดเจน ได้แก่ ความกว้าง ความยาว และพื้นที่ โดยได้ทดลองกับเคอร์เนล (kernel) 4 รูปแบบของ SVM ได้แก่ linear, RBF, polynomial และ sigmoid ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโมเดลตรวจจับมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อใช้ Epochs เท่ากับ 400 และ batch size เท่ากับ 64 โดยมีค่า Precision เท่ากับ 0.9817และ Recall เท่ากับ 0.9706 ขณะที่โมเดลคัดขนาดมีประสิทธิภาพสมบูรณ์ด้วยค่า Precision และ Recall ใกล้เคียง 1 ในทุกเคอร์เนล แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบยังมีข้อจำกัดเนื่องจากขั้นตอนการตรวจจับที่ยังมีข้อผิดพลาดในบางกรณี การศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าระบบสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์และทำให้สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ไทยในตลาดโลก โดยช่วยลดต้นทุนแรงงานและยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น การพัฒนาในอนาคตควรมุ่งเน้นการปรับปรุงขั้นตอนการตรวจจับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในภาพรวม

คำสำคัญ: การคัดแยกเม็ดมะม่วงหิมพานต์, การเรียนรู้เชิงลึก, การเรียนรู้ของเครื่อง, การจำแนกตามขนาด

Abstract

The research problem originated from the limitations of traditional cashew nut size classification methods, which result in high labor costs and inconsistent product quality, affecting the competitiveness of Thailand's cashew nut industry in the global market. The research objective was to develop a high-precision cashew nut size classification system by integrating deep learning and machine learning techniques. The proposed methodology involves a hybrid cashew nut size classification system. First, a deep learning technique utilizing YOLOv5 was applied to detect cashew nuts from images, with experiments conducted to determine the optimal and most efficient parameters. Subsequently, machine learning using a Support Vector Machine (SVM) was employed for size classification based on dominant morphological features, including width, length, and area. The SVM model was evaluated using four kernel types: linear, radial basis function (RBF), polynomial, and sigmoid. The results indicated that the detection model performed optimally when using 400 epochs and a batch size of 64, achieving a precision of 0.9817 and a recall of 0.9706. Furthermore, the size classification model achieved perfect performance, yielding precision and recall values of 1.0 across all tested

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

[2] ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[1] Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

[2] Department of Computer Science and Information Technology, Faculty of Science, Naresuan University

* Corresponding author; E-mail: sakesan@psru.ac.th

kernels. However, the overall system performance still had minor limitations due to occasional errors in the detection step. In conclusion, this system can improve the accuracy of cashew nut size classification and enhance the competitiveness of Thailand's cashew nut industry in the global market by reducing labor costs and improving product quality consistency. Future developments should focus on refining the detection process to further enhance the overall system efficiency.

Keywords: Cashew nut classification, deep learning, machine learning, size classification, YOLOv5

บทนำ

อุตสาหกรรมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ของประเทศไทยกำลังเผชิญความท้าทายที่สำคัญ แม้จะเป็นผู้ส่งออกอันดับที่ 16 ของโลก โดยมีปริมาณการส่งออก 24,923 ตันในปี 2565 (World Population Review, n.d.) แต่อุตสาหกรรมนี้มีแนวโน้มถดถอยอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา สาเหตุหลักเกิดจากปัญหาด้านการควบคุมคุณภาพและกระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการคัดขนาดซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก เม็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในจังหวัดอุตรดิตถ์ ชลบุรี และระนอง อย่างไรก็ตาม กระบวนการคัดแยกขนาดแบบดั้งเดิมยังคงต้องพึ่งพาแรงงานคนและเครื่องมือกลอย่างตะแกรงร่อนหลายชั้น ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ ประสิทธิภาพ และการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

งานวิจัยก่อนหน้าได้นำเสนอแนวทางทางเทคนิคหลายรูปแบบสำหรับการจำแนกเม็ดมะม่วงหิมพานต์แบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 แนวทางหลัก ได้แก่ การประมวลผลภาพ (Image Processing) การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ในด้านการประมวลผลภาพ งานวิจัยของ Sunoj *et al*. (2018) ได้พัฒนาวิธีการที่ใช้ความเข้มของระดับสีเทาและมิติของเงาด้วยเทคนิคการแบ่งส่วนภาพ เพื่อแยกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ออกจากพื้นหลัง โดยสามารถจำแนกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือเม็ดที่สมบูรณ์ทั้งเม็ดและเม็ดที่แตก แม้ว่าวิธีนี้จะให้ความแม่นยำสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม แต่ยังมีข้อจำกัดกับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแสงที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลต่อการวิเคราะห์ระดับสีเทาและโครงสร้างของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Sunoj *et al*., 2018)

การเรียนรู้ของเครื่องเป็นอีกแนวทางที่ได้รับการพัฒนา อัลกอริทึม Random Forest (Baitu *et al*., 2023) ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถจำแนกเม็ดสีขาวและเม็ดที่มีรอยไหม้ได้อย่างแม่นยำถึง 99.8% อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ถูกจำกัดให้ใช้กับการจำแนกประเภทแบบทวิภาค (Binary Classification) เท่านั้น ในขณะที่ระบบคัดเกรดอัตโนมัติที่ใช้ Support Vector Machine (SVM) สามารถจำแนกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ตามสีและขนาดได้ด้วยความแม่นยำ 95% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SVM ในการพัฒนาระบบคัดเกรดที่แม่นยำและเชื่อถือได้ ส่วนการเรียนรู้เชิงลึกมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกประเภท โดยเฉพาะการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ในการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ไม่ได้คุณภาพ งานวิจัยหลายงานได้ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมเครือข่ายประสาทเทียมเชิงลึกแบบ DCNN (Kumari *et al*., 2021) ซึ่งให้ความแม่นยำในการจำแนกประเภทเม็ดมะม่วงหิมพานต์ตั้งแต่ 95.1% ถึง 98.4% แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ยังคงมีความท้าทายด้านความซับซ้อนของโมเดลและปัญหาการเกิด Overfitting

งานวิจัยปัจจุบันมุ่งไปที่การใช้สถาปัตยกรรม YOLOv8 ที่สามารถจำแนกประเภทเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Pham *et al*., 2024) โดยมีอัตราความผิดพลาดเพียง 2.96% ระบบนี้ใช้กล้องต้นทุนต่ำร่วมกับสายพานลำเลียง และฝึกโมเดลด้วยภาพตัวอย่าง 1,500 ภาพ และมีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ YOLOv8 ในการตรวจจับวัชพืชหลายชนิดในไร่ฝ้ายของสหรัฐอเมริกา โดยเปรียบเทียบกับโมเดลอื่น ๆ เช่น YOLOv5 และ Faster R-CNN ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า YOLOv8 มีความแม่นยำสูง (Zha *et al*., 2025)

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การคัดแยกคุณภาพของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ในขณะที่ยังขาดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคัดแยกขนาดซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดราคา โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการคัดขนาดของผลผลิตทางการเกษตรอื่น เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติสำหรับคัดแยกและคัดเกรดผลไม้ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของผลไม้ เช่น สี รูปร่าง และขนาด ควบคู่กับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่สามารถปรับปรุงความแม่นยำได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีข้อมูลมากขึ้น ข้อจำกัดหลักของงานวิจัยนี้อยู่ที่สภาพแวดล้อมที่หลากหลายอาจส่งผลต่อความแม่นยำ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคัดขนาดแอปเปิ้ลโดยใช้เทคโนโลยีการรู้จำภาพและเทคนิค Laplacian

(Zhang *et al*., 2024) เพื่อหาขอบของแอปเปิ้ลและคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลาง ผลการทดลองพบว่าการใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของแอปเปิ้ลมีความถูกต้อง 95% ส่วนการใช้สี่เหลี่ยมภายนอกมีความถูกต้อง 82.5% รวมถึงมีงานวิจัยที่นำเสนอการวัดขนาดแอปเปิ้ลบนต้นโดยใช้กล้องความลึกและ YOLOv5 (Song *et al*., 2022) ที่มีความถูกต้องเท่ากับ 92% แต่ยังมีข้อจำกัดที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแสง

ความท้าทายสำคัญในการพัฒนาระบบคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์อยู่ที่การพัฒนาโมเดลให้สามารถรองรับปัจจัยสภาพแวดล้อมที่มีหลากหลาย และการบูรณาการคุณลักษณะหลายประเภทเพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบคัดแยกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ตามขนาดที่มีความแม่นยำสูง โดยอาศัยเทคโนโลยี YOLO เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการแบบดั้งเดิม ลดต้นทุนแรงงาน และยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมเม็ดมะม่วงหิมพานต์ไทยในตลาดโลกได้อย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการแบบผสมที่รวมการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) กับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และการเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ วิธีการแบบผสมนี้ใช้จุดแข็งของทั้งการเรียนรู้เชิงลึกและการเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิม ทำให้ระบบมีมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการประมวลผลเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งการเรียนรู้เชิงลึกลดข้อจำกัดเรื่องสภาพแวดล้อมที่หลากหลายที่ส่งผลต่อความแม่นยำ ในการตรวจจับและการแบ่งส่วนเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ในขณะที่การเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิมจะทำการจำแนกขนาดได้อย่างแม่นยำโดยใช้อัลกอริทึมที่เป็นที่ยอมรับและคุณลักษณะเฉพาะด้านในการจำแนกขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ผู้วิจัยใช้เม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผลิตในประเทศไทย โดยเฉพาะจากจังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งจัดกลุ่มตามขนาดมาตรฐาน ได้แก่ W180: ขนาดใหญ่ที่สุด (180 เม็ดต่อปอนด์), W240: ขนาดใหญ่รองลงมา (240 เม็ดต่อปอนด์), W320: ขนาดกลาง (320 เม็ดต่อปอนด์) และW450: ขนาดเล็กที่สุด (450 เม็ดต่อปอนด์) โดยมีละเอียดดัง Table 1

Table 1 Details of cashew nuts by size

Size	Width (mm)	Height (mm)
W180	20	34
W240	17	27
W320	15	23
W450	13	22

1. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

เม็ดมะม่วงหิมพานต์ถูกจัดเป็น 4 ขนาด โดยใช้เครื่องวัดความกว้างและความยาวของแต่ละเม็ดด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์เพื่อยืนยันความถูกต้องของขนาดก่อนที่จะใช้ในการถ่ายภาพ ภาพจะถูกถ่ายด้วยกล้องมือถือดิจิทัลที่มีความละเอียด 1024*1024 พิกเซลภายใต้สภาพแสงที่เหมาะสมและในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมเพื่อให้ได้ภาพคุณภาพสูงสำหรับการประมวลผล เม็ดมะม่วงหิมพานต์ถูกจัดเรียงตามขนาดที่กำหนดบนกระดาษสีขาว โดยกล้องจะวางอยู่ที่ความสูง 30 เซนติเมตรจากพื้นที่จัดไว้

การศึกษานี้ได้ถ่ายภาพ โดยมีรายละเอียดแสดงดัง Table 2 โดยในภาพที่ถ่ายมีทั้งเม็ดที่ติดกันรวมอยู่ด้วยเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริง

Table 2 Image Acquisition Details of Cashew Nuts

Size	Number of Cashew nuts image	Train set	Validation set	Test set	Total images	Total cashew nuts
W180	9	26	4	8	38	342
W240	10	26	4	8	38	380
W320	11	26	4	7	37	407
W450	12	27	3	7	37	444
Total images		105	15	30	150	
Total cashew nuts		1,104	156	313		1573

จากภาพที่ถ่ายได้มีการสร้างภาพเพิ่มให้มีความหลากหลายของความสว่างของภาพเพื่อให้ได้โมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีประสิทธิภาพกับภาพที่แสดงที่แตกต่างกันด้วย โดยได้มีการปรับเพิ่มลดแสงให้ภาพแบบสุ่มภาพละ 5 ระดับ ดังนั้นจะมีภาพทั้งหมด 750 ภาพ และมีจำนวนเม็ดทั้งหมด 7865 เม็ด

ตัวอย่างภาพที่แสดงใน Figure 1 และ Figure 2 โดยชุดข้อมูลนี้ถูกแบ่งออกเป็นสามชุด ได้แก่ ชุดฝึกอบรม (training set), ชุดทดสอบ (validation set) และชุดทดสอบจริง (testing set) ในอัตราส่วน 70:20:10 ตามลำดับ

Dataset จะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ Dataset 1 คือ Dataset ของโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งจะเป็นการตีกรอบรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และสร้างป้ายกำกับ (Label) เป็น binary class คือเป็นเม็ดมะม่วงหิมพานต์หรือไม่ใช่ ส่วน Dataset 2 คือ Dataset ของโมเดลคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งจะเป็นการตีกรอบรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ และสร้าง สร้างป้ายกำกับเป็น 4 คลาส (Class) คือ 4 ขนาดมาตรฐานของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ แสดงดัง Figure 1

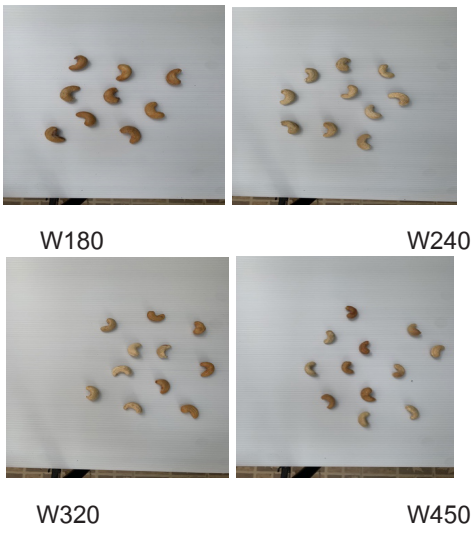


Figure 1 Sample images in dataset



Figure 2 Examples of Images with Brightness Variations

วิธีการนี้ช่วยให้การเก็บข้อมูลภาพเป็นมาตรฐานและมีคุณภาพสูงสำหรับการประมวลผลและวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป การให้ความสำคัญในการตรวจสอบการวัดและการถ่ายภาพในสภาวะที่ควบคุมได้ช่วยรักษาความสอดคล้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลสำหรับกระบวนการฝึกเครื่องเรียนรู้

2. วิธีการคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์

งานวิจัยนี้ออกแบบระบบคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์แบบผสมผสานโดยการรวม Deep Learning และ Machine Learning เข้าด้วยกัน โดยใช้ Deep Learning ในการพัฒนาโมเดลเพื่อจับภาพเม็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละเม็ด เนื่องจากสามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแสงที่หลากหลายและพื้นหลังที่แตกต่างกัน ขณะเดียวกัน Machine Learning ถูกนำมาใช้ในการสร้างโมเดลสำหรับการคัดขนาด เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องการขอบเขตขนาดที่ชัดเจนโดยอ้างอิงจากคุณลักษณะโครงสร้างหลักของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เช่น ความกว้าง ความสูง หรือพื้นที่ โดยคุณลักษณะเหล่านี้มีความสำคัญสำหรับการพัฒนาโมเดลการคัดแยกที่มีประสิทธิภาพสูงและ Machine Learning เหมาะสมกว่า Deep Learning สำหรับงานนี้ เพราะคุณลักษณะที่เลือกใช้ตรงกับคุณลักษณะที่ใช้ในกระบวนการคัดแยกแบบดั้งเดิมที่อิงจากมนุษย์ กระบวนการทำงานของระบบนี้แสดงใน Figure 3

2.1 โมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Detection Model)

การศึกษาครั้งนี้จะประยุกต์ใช้ YOLOv8 ในตรวจหาเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เพื่อให้ได้ขอบเขตของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เพื่อนำไปใช้สำหรับดึงลักษณะสำคัญที่ใช้สำหรับการคัดแยกขนาดขั้นตอนต่อไป ได้แก่ ความกว้าง ความสูง และพื้นที่ของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยจะนำภาพใน Dataset1 ที่มีป้ายกำกับสำหรับระบุตำแหน่ง ขอบเขตของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในแต่ละภาพ

การสร้างโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้ YOLO8 ซึ่งจะฝึกโมเดลเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้โมเดลที่สามารถตรวจหาเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้อย่างแม่นยำ

2.2 โมเดลคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Size Classification Model)

ขั้นตอนนี้จะนำผลลัพธ์โมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นกรอบสี่เหลี่ยมรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในแต่ละภาพมาสร้างโมเดลสำหรับการคัดแยกขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยการสร้างโมเดลคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วง

หิมพานต์ได้ใช้ Support Vector Machine (SVM) เนื่องจาก SVM มีความสามารถในการสร้างขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในกระบวนการนี้ประกอบด้วยคุณลักษณะของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ได้แก่ ความกว้าง ความสูง และพื้นที่ ซึ่งได้จาก Dataset 2 ซึ่งทำป้ายกำกับเป็นกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในแต่ละขนาด 4 ตามขนาดมาตรฐาน ได้แก่ W180, W240, W320, และ W450 โดยเม็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาดก่อนที่จะนำมาถ่ายรูปเก็บได้ถูกวัดขนาดที่แน่นอนด้วยเวอร์เนียร์เพื่อให้ได้ขนาดที่ตรงตามช่วงที่กำหนดให้ขนาดมาตรฐาน

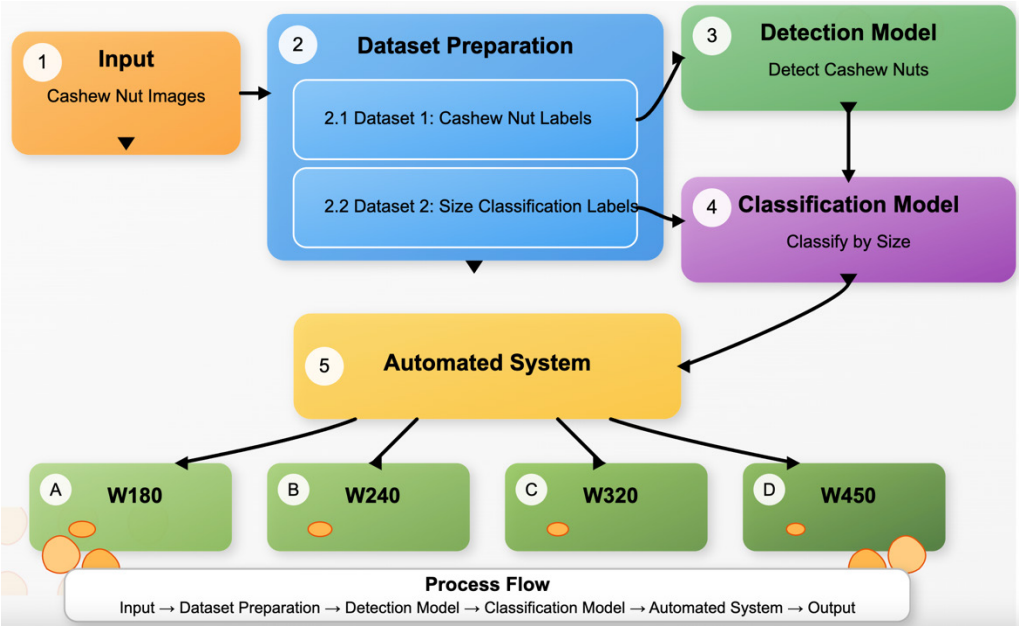


Figure 3 Cashew nut size classification using hybrid learning techniques

3. เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ

3.1 การวัดประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ค่า Mean Average Precision (mAP) จะถูกใช้เพื่อตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยจะพิจารณาความแม่นยำในการจำแนกตำแหน่งของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่พบในภาพหรือไม่พบ โดยการคำนวณ mAP จะใช้ค่า Precision และ Recall ที่ได้จากการประเมินโมเดลในแต่ละ Threshold ของค่า Intersection over Union (IoU) ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการทำนายตำแหน่งของวัตถุในภาพ โดย mAP จะรวมค่า Average Precision (AP) จากหลายๆ คลาส หรือหลายๆ Threshold มาเป็นค่าเดียวที่สามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลได้ (LearnOpenCV, 2021)

สมการของ Precision และ Recall สำหรับการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ สามารถคำนวณดังสมการ 1 และ 2

$$Precision = \frac{True\ Positives(TP)}{\text{True Positives(TP)} + \text{False Positives(FP)}} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{True\ Positives(TP)}{\text{True Positives(TP)} + \text{False Negatives(FN)}} \quad (2)$$

โดยที่ True Positive (TP) คือจำนวนที่ตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ได้ถูกต้อง

False Positive (FP) คือ จำนวนที่ตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ผิด

False Negative (FN) คือ จำนวนที่ตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่พบ

การคำนวณ AP สำหรับแต่ละคลาสจะเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของ Precision ที่หลากหลายระดับของ Recall และ mAP จะถูกคำนวณโดยการหาค่าเฉลี่ยของ AP สำหรับแต่ละคลาส ในงานวิจัยนี้คือคลาสเม็ดมะม่วงหิมพานต์และไม่ใช่เม็ดมะม่วงหิมพานต์ ตามสมการ 3

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i \quad (3)$$

โดยที่ N คือจำนวนของคลาส และ AP_i คือค่า Average Precision ของแต่ละคลาส ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ mAP50 ซึ่งจะใช้ค่า IoU ที่ 0.50 โดยที่ค่า IoU ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 จะถือว่าการตรวจจับนั้นถูกต้อง นอกจากนี้จะใช้ mAP50-95 ที่คำนวณจากค่า IoU ตั้งแต่ 0.50 ถึง 0.95 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.05 ค่า IoU ที่ใช้คำนวณ ได้แก่ 0.50, 0.55, 0.60, ..., 0.95 ค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของ AP ในช่วงนี้ mAP50-95 มีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งวัตถุที่สูงกว่า mAP50 เพราะใช้ IoU หลายค่า ทำให้สะท้อนประสิทธิภาพของโมเดลได้ดีกว่า

นอกจากนี้จะใช้ค่า Fitness เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินคุณภาพของโมเดลที่ฝึกมา และช่วยเลือก Weights ที่ดีที่สุดจากแต่ละ epoch ในระหว่างการฝึก ทำให้ได้โมเดลที่มีความแม่นยำสูงสุด โดยที่โมเดลที่ดีจะมีค่า Fitness สูงกว่า 0.5 ขึ้นไป โดยสามารถคำนวณด้วย สมการ 4

$$Fitness = 0.9 \times mAP50\text{-}95 + 0.1 \times Recall \quad (4)$$

3.2 การวัดประสิทธิภาพของโมเดลคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ในการจำแนกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มี 4 ขนาด จะถูกวัดประสิทธิภาพด้วยค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-Score โดยที่ Accuracy คืออัตราส่วนของจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ดังสมการ 5

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (5)$$

โดยที่ TP (True Positive) คือจำนวนครั้งที่โมเดลทำนายขนาดถูกต้อง

TN (True Negative) คือจำนวนครั้งที่โมเดลทำนายว่าไม่ใช่ขนาดนั้นและถูกต้อง

FP (False Positive) คือจำนวนครั้งที่โมเดลทำนายผิดว่าเป็นขนาดหนึ่งในขณะที่คำตอบคือไม่ใช่ขนาดนั้น

FN (False Negative) คือจำนวนครั้งที่โมเดลผิดพลาดไม่สามารถจำแนกขนาดที่ถูกต้องได้

Precision และ Recall เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญเมื่อพิจารณาการจำแนกแต่ละขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดย Precision จะคำนวณจากสัดส่วนของตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าเป็นขนาดใดขนาดหนึ่งแล้วถูกต้องเทียบกับจำนวนทั้งหมดที่โมเดลทำนายว่าเป็นขนาดนั้น ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของโมเดลในแต่ละขนาด โดยที่ Recall จะวัดว่าโมเดลสามารถดึงตัวอย่างทั้งหมดของขนาดนั้นๆ ออกมาได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าสูงหมายถึงโมเดลสามารถจับตัวอย่างที่เป็นขนาดนั้นๆ ได้ดีโดยมีความผิดพลาด (False Negative) น้อย ซึ่งชี้ให้เห็นความแม่นยำในการคัดแยกเม็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาดได้ครบถ้วน หาก Precision สูงแสดงว่าโมเดลให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำ แต่ถ้า Recall สูงหมายถึงโมเดลสามารถจับตัวอย่างทั้งหมดของขนาดนั้นได้ครบถ้วน

F1-Score เป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักระหว่าง Precision และ Recall เพื่อลดปัญหาการพึ่งค่าค่าใดค่าหนึ่งมากเกินไป โดยคำนวณจากสมการ 6

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (6)$$

ค่าที่สูงหมายถึงโมเดลมีความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall ทำให้สามารถจำแนกขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ทั้งแม่นยำและครบถ้วน ส่วนค่า F1-Score มีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่มีความไม่สมดุลของข้อมูลระหว่างแต่ละขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เช่น หากขนาดหนึ่งมีตัวอย่างมากกว่าอีกขนาดหนึ่งมากเกินไป ซึ่งค่า Accuracy ที่สูงแต่ไม่ได้สะท้อนถึงประสิทธิภาพจริงของโมเดล ดังนั้นค่า F1-Score จึงช่วยให้สามารถประเมินผลได้แม่นยำยิ่งขึ้นสำหรับแต่ละขนาดและสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลได้ดียิ่งขึ้น

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการทดลองโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์

การรทดลองสำหรับโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อให้ได้บริเวณที่เป็นเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้ Dataset 1 และมีปรับพารามิเตอร์สำหรับการสร้างโมเดล ได้แก่ Epochs(E) จำนวนในการฝึก (100,200,300,400,500) และ Batch size (B) ขนาดของชุดข้อมูลที่ถูกใช้ในแต่ละรอบการฝึกอบรม คือ 64 ผลการทดลองแสดงดัง Table 3

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม Epochs จาก 100 เป็น 500 ภายใต้ Batch size 64 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดล โดยค่า mAP50 เพิ่มจาก 0.9842 เป็น 0.9875 และค่า mAP50-95 สูงสุดที่ epoch 300 ก่อนลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ Precision และ Recall ที่ดีขึ้นส่งผลให้ F1 Score เพิ่มจาก 0.9662 เป็น 0.9950 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้อย่างแม่นยำและครอบคลุม ซึ่งหากพิจารณาทั้งด้านประสิทธิภาพ ความเสี่ยงของ overfitting และเวลาในการฝึก โมเดลที่เหมาะสมที่สุดคือ

โมเดลที่ฝึกด้วย Epoch เท่ากับ 400 เพราะมีค่า Precision, Recall, mAP50, mAP50-95 และ F1 Score อยู่ในระดับสูงมากอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะ F1 Score ที่สูงถึง 0.9761 ซึ่งแสดงถึงความสมดุลที่ดีระหว่าง Precision และ Recall ขณะเดียวกันก็ยังควบคุมความเสี่ยงจาก overfitting ได้ดีกว่าโมเดลที่ Epoch เท่ากับ 500 โดยแสดงผลลัพธ์ของโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ดัง Figure 4 และ Figure 5

ดังนั้นโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์จาก Batch Size 64 และ Epochs 400 จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อให้ได้กรอบของเม็ดมะม่วงหิมพานต์และนำไปใช้สำหรับคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในขั้นตอนถัดไป รวมถึงพัฒนาเพื่อการประยุกต์ใช้งานในระบบอัตโนมัติสำหรับการแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในอนาคต

Table 3 Comparative performance results of cashew nut detection models based on epochs and batch size Annotation:Epochs(E), Batch size (B), Precision(P), Recall(R)

E	B	P	R	mAP 50	mAP 50-95	F1 Score
100	64	0.9657	0.9667	0.9842	0.8595	0.9662
200	64	0.9798	0.9529	0.9858	0.8626	0.9662
300	64	0.9686	0.9671	0.9874	**0.8694**	0.9678
400	64	**0.9817**	**0.9706**	**0.9875**	0.8673	**0.9761**
500	64	**0.9998**	**0.9902**	**0.9950**	0.8634	**0.9950**

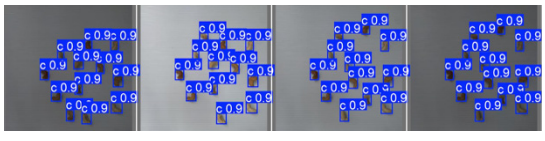


Figure 4 Experimental results of the cashew nut detection model with Batch Size 64 and 400 Epochs

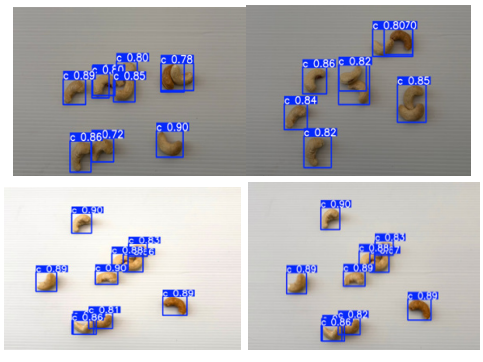


Figure 5 Example detection results of overlapping cashew nuts

2. ผลการทดลองโมเดลคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์

ในกระบวนการคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วย SVM โดยใช้ Dataset 2 ซึ่งประกอบด้วย 4 ขนาดมาตรฐานมะม่วงหิมพานต์ โดยนำความกว้าง ความยาว และพื้นที่ของกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นลักษณะสำคัญ (Feature) สำหรับสร้างโมเดลคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้ SVM ซึ่งได้ทดลองกับเคอร์เนล (Kernel) 3 รูปแบบของ SVM ได้แก่ Linear, RBF และ Polynomial โดยแต่ละ Kernel ได้ทดลอง Hyperparameter Tuning แบบ Grid Search เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละ Kernel ซึ่ง Grid search จะเหมาะสมกับการทดลองที่มีพารามิเตอร์น้อยและต้องการให้ได้ความแม่นยำสูง โดยในการทดลองได้มีการปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละ Kernel ได้แก่ C คือค่าควบคุมขนาดของ Margin ประกอบด้วยค่า [0.1, 1, 10, 100, 200], gamma คือควบคุมอิทธิพลของตัวอย่างข้อมูล ซึ่งมีค่า [1, 0.1, 0.01, 0.001] และ class_weight จะปรับค่าอัตโนมัติให้เหมาะกับจำนวนข้อมูลในแต่ละคลาส ซึ่งจะทำลองโดยใช้ 10-fold Cross-Validation เพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองแสดงดัง Table 4

Table 4 Performance of Cashew Nut Sizing Models

Kernel	Precision	Recall	F1-Score
Linear	0.99	1.00	1.00
RBF	0.99	0.99	0.99
Polynomial	1.00	0.98	0.99

ผลลัพธ์จากตารางแสดงให้เห็นว่า โมเดล SVM ที่ใช้ Kernel ต่าง ๆ ได้แก่ Linear, RBF และ Polynomial มีค่า Precision, Recall, F1-Score และ Accuracy เท่ากับ 1.00 ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถจำแนกข้อมูลได้ใกล้เคียง 100% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าชุดข้อมูลของขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์อาจมีโครงสร้างที่แยกกันอย่างชัดเจน ทำให้ SVM สามารถสร้างเส้นแบ่งที่เหมาะสมได้ทุก Kernel อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ การที่ค่า F1-Score ใกล้เคียง 1.00 สะท้อนว่าโมเดลไม่มีปัญหาความไม่สมดุลของข้อมูล (Imbalanced Data) และสามารถดึงคุณลักษณะสำคัญออกมาได้ดี และแสดงถึงความสามารถของโมเดลในการคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้อย่างแม่นยำและครอบคลุมในทุกขนาด โดยแสดงตัวอย่างผลการทดลองดัง Figure 6 ซึ่งทดลองแบบมีหลายขนาดและมีวัตถุอื่นๆ



Figure 6 Results of cashew nut size classification model



Figure 7 Scatter plot showing the relationship between width and heigth of cashew nuts of each size

จากกราฟ Scatter Plot ใน Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความยาวของกรอบที่ล้อมรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละเม็ด โดยมีการแบ่งสีตามขนาด 4 ขนาด จะเห็นว่าความกว้างและความยาวของแต่ละขนาดสามารถแบ่งแยกกันค่อนข้างชัดเจน ซึ่งทำให้เห็นว่าการใช้ SVM ในการแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ดี แม้จะมีบางส่วนที่ซ้อนทับกันบ้าง

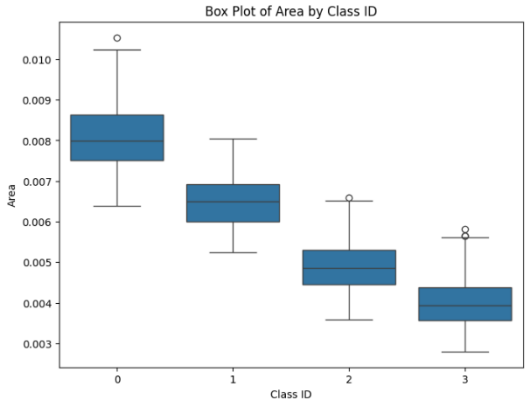


Figure 8 Box plot showing the area range of cashew nuts by size

จากการวิเคราะห์พื้นที่ของกรอบเม็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้ Box Plot ใน Figure 8 ที่แสดงการกระจายตัวของพื้นที่ของเม็ดมะม่วงหิมพานต์แต่ละขนาดตาม Class ID (0-3) แสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างแต่ละขนาด ซึ่งการแบ่งแยกที่ชัดเจนนี้บ่งชี้ว่าค่าพื้นที่เป็นตัวแปรที่ดีในการจำแนกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์

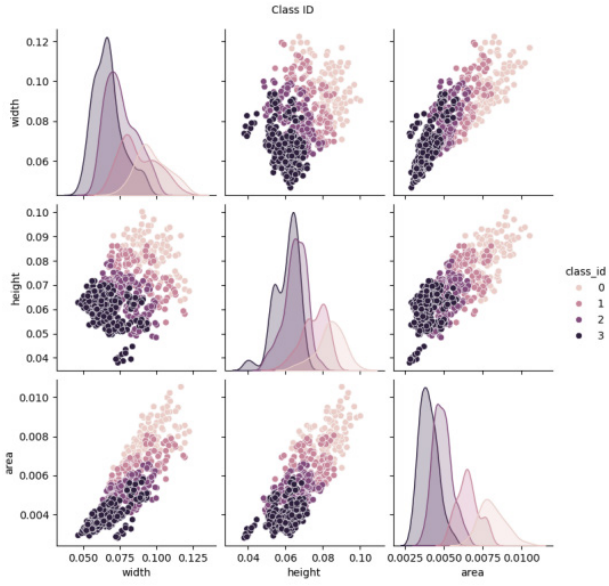


Figure 9 Graph showing width, length, and area of cashew nuts of each size

จากกราฟ Pair Plot ใน Figure 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความกว้าว ความยาวและพื้นที่ของเม็ดมะม่วงหิมพานต์โดยแบ่งตาม class_id ทั้ง 4 ขนาด (0-3) ตามขนาดของเม็ดมะม่วงหิมพานต์จากเล็กไปใหญ่ พบว่าข้อมูลมีการแบ่งกลุ่มที่ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าวกับความยาวที่แสดงการจัดกลุ่มได้ดี ส่วนกราฟความหนาแน่น (Density plot) บนแนวทแยงมุมแสดงการกระจายตัวของแต่ละตัวแปร ซึ่งมีการซ้อนทับกันบางส่วนระหว่างคลาส แต่ยังสามารถแยกแยะได้ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างตัวแปรทั้งสาม คือเมื่อค่าหนึ่งเพิ่มขึ้น อีกค่าหนึ่งมักจะเพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะการกระจายตัวเช่นนี้บ่งชี้ว่าชุดข้อมูลนี้น่าจะเหมาะสมสำหรับการใช้ในการสร้างโมเดลคัดแยกขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ เนื่องจากมีการแบ่งกลุ่มที่ค่อนข้างชัดเจน

เมื่อพิจารณานำผลการทดลองโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่า Precision 0.9817และ Recall สูงถึง 0.9706 บ่งบอกว่าโมเดลสามารถตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ส่วนใหญ่ได้ดีมีโอกาสพลาดน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อส่งผลการตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ไปยัง โมเดลคัดแยกขนาดเม็ด

มะม่วงหิมพานต์พบว่าค่า Precision และ Recall ใกล้เคียงกับ 1 หมายความว่าเมื่อโมเดลได้รับผลลัพธ์ของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ตรวจจับมาแล้วจะสามารถจำแนกขนาดได้อย่างแม่นยำ แต่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอาจถูกจำกัดด้วยขั้นตอนการตรวจจับซึ่งยังมีการตรวจจับผิดพลาด

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ได้ออกแบบระบบกาคัดขนาดเม็ดมะม่วงหิมพานต์แบบผสมผสานโดยใช้ Deep Learning และ Machine Learning ร่วมกัน โดยใช้ Deep Learning ในการพัฒนาโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในภาพ ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งของเม็ดมะม่วงหิมพานต์ในสภาพแสงและเงาที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Machine Learning ใช้ในการสร้างโมเดลสำหรับคัดขนาด เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องการขอบเขตขนาดที่ชัดเจนโดยอาศัยลักษณะโครงสร้างหลัก เช่น ความกว้าง ความสูง หรือพื้นที่ ซึ่ง Machine Learning เหมาะสมกว่าการใช้ Deep Learning สำหรับงานนี้ เนื่องจากลักษณะเหล่านี้ตรงกับลักษณะที่ใช้ในการคัดขนาดโดยมนุษย์ ผลการทดลองของโมเดลตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์แสดงให้เห็นสามารถตรวจจับเม็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ส่วนใหญ่โดยมีโอกาสผิดพลาดน้อย ในขณะที่โมเดลจัดประเภทขนาดมีประสิทธิภาพสูงเมื่อได้รับผลการตรวจจับจากโมเดลแล้ว ระบบสามารถจัดประเภทขนาดได้อย่างถูกต้องทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอาจได้Sรับผลกระทบจากขั้นตอนการตรวจจับที่ยังมีข้อผิดพลาดบ้างในบางกรณี ดังนั้นการศึกษาในอนาคตจะพิจารณาปรับปรุงขั้นตอนการตรวจจับและพัฒนาโมเดลให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในภาพรวม

เอกสารอ้างอิง

Baitu, G. P., Gadalla, O. A. A., & Öztekin, Y. B. (2023). Traditional machine learning-based classification of cashew kernels using colour features. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, *20*(1), 115–124. https://doi.org/10.33462/jotaf.1100782

Kumari, A. S. S. S. R., Anjaneyulu, K. S. R., & Krishna, K. S. R. (2021). Classification of first quality fancy cashew kernels using four deep convolutional neural network models. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 3423–3429. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.897

LearnOpenCV. (2021). *Mean average precision (mAP) in object detection*. https://learnopencv.com/mean-average-precision-map-object-detection-model-evaluation-metric/

Pham, V.-N., Do Ba, Q.-H., Tran Le, D.-A., Nguyen, Q.-M., Do Van, D., & Nguyen, L. (2024). A low-cost deep-learning-based system for grading cashew nuts. *Computers*, *13*(3), Article 71. https://doi.org/10.3390/computers13030071

Song, X., Li, Z., Zhang, X., & Liu, J. (2022). Recognition and counting of apples in a dynamic state using a 3D camera and deep learning algorithms for robotic harvesting systems. *Sensors*, *22*(19), Article 7012. https://doi.org/10.3390/s22197012

Sunoj, S., Igathinathane, C., & Jenicka, S. (2018). Cashews whole and splits classification using a novel machine vision approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, *145*, 19. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.034

World Population Review. (n.d.). *Cashew production by country*. Retrieved February 27, 2025, from https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cashew-production-by-country

Zha, Y., Yang, L., Liu, Y., Ma, Y., Li, D., & Wang, H. (2025). Weed recognition in cotton fields based on YOLOv8. *Intelligent Agriculture*, *1*(1), Article 100019. https://doi.org/10.1016/j.inag.2025.100019

Zhang, Y., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2024). Apple fruit edge detection model using a rough set and convolutional neural network. *Sensors*, *24*(7), Article 2283. https://doi.org/10.3390/s24072283

การจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง
Classification of offences in narcotic cases using machine learning

สุทัศน์ แท่นทอง[1*] และวรัญญา ปุณณวัฒน์[2]
Suthat Tanthong[1*] and Waranya Poonnawat[2]
Received: 6 February 2025 ; **Revised**: 11 May 2025 ; **Accepted**: 14 July 2025

บทคัดย่อ
การพิจารณาเอกสารคำฟ้องในคดียาเสพติดต้องใช้เวลาและความรอบคอบ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของเจ้าหน้าที่ การนำเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องช่วยจำแนกข้อความในเอกสารคำฟ้อง เพื่อแยกประเภทฐานความผิด สามารถลดภาระการอ่านและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานในกระบวนการยุติธรรมให้รวดเร็วและเป็นอัตโนมัติได้ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง โดยดำเนินการ 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) รวบรวมข้อมูลคดียาเสพติดจากศาลจังหวัดสุพรรณบุรี 1,651 ตัวอย่าง (ม.ค. 2565 – พ.ค. 2567) 2) สำรวจข้อมูล 3) เตรียมข้อมูลด้วย PyThaiNLP และ TF-IDF 4) พัฒนาแบบจำลองการจำแนกฐานความผิด แบ่งเป็น 2 ลำดับขั้น ได้แก่ ลำดับที่ 1 จำแนกชนิดยาเสพติด ใช้วิธีจำแนกประเภทแบบหลายคลาส กลยุทธ์ OneVsRest และลำดับที่ 2 จำแนกลักษณะการกระทำความผิด ใช้วิธีจำแนกประเภทแบบหลายป้าย กลยุทธ์ Classifier Chains 5) ทั้งสองลำดับเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง 3 เทคนิค ได้แก่ SVM, Logistic Regression และ Random Forest โดยทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี 5-Fold cross validation พบว่า Random Forest มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูงสุดในการจำแนกทั้งสองลำดับ โดยลำดับที่ 1 ได้ค่า F1-Score ร้อยละ 99.55 และลำดับที่ 2 ได้ค่า F1-Score ร้อยละ 97.70 พร้อมค่า Hamming loss ร้อยละ 1.58 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีศักยภาพสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดได้

คำสำคัญ: การเรียนรู้ของเครื่อง, การจำแนกข้อความ, การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, คดียาเสพติด

Abstract
The examination of indictments in narcotic cases requires considerable time and attention to detail, posing challenges for judicial officers. This study aimed to reduce such burdens and enhance the efficiency of the justice process. Therefore, the objective of this research was to develop and evaluate the performance of a machine learning model for classifying offences in narcotic cases. The research consisted of five main steps: (1) collecting 1,651 narcotic case samples from the Suphanburi Provincial Court (January 2022 – May 2024), (2) exploring the dataset, (3) preprocessing the data using PyThaiNLP and TF-IDF, (4) developing a two-stage classification model, where stage one classified narcotic types using a multi-class classification with a One-vs-Rest strategy, and stage two classified the nature of the offence using a multi-label classification with a Classifier Chains strategy, and (5) evaluating the model performance using three algorithms (Support Vector Machine, Logistic Regression, and Random Forest) via 5-fold cross-validation. The results indicated that the Random Forest algorithm achieved the highest performance and stability in both stages, with an F1-score of 99.55% for stage one and 97.70% for stage two, along with a Hamming Loss of 1.58%. These findings demonstrate the potential of the proposed model in assisting the classification of offences in narcotic cases.

Keywords: Machine learning, text classification, natural language processing, narcotic cases

[1] แขนงวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
[2] รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
[1] Digital Technology Program, School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University
[2] Associate Professor, School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University
* Corresponding author; E-mail: suthat.tanthong@gmail.com

บทนำ

ประมวลกฎหมายยาเสพติด (2564) มีผลบังคับใช้ตั้งแต่ 9 พฤศจิกายน 2564 โดยปรับปรุงแนวทางแก้ปัญหายาเสพติดอย่างเป็นระบบ ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชน ให้ความสำคัญกับการบำบัดรักษามากกว่าการลงโทษอย่างเข้มงวด และพิจารณาปัจจัยเฉพาะบุคคลเพื่อให้บทลงโทษสอดคล้องกับลักษณะการกระทำความผิด สำนักงานศาลยุติธรรมจึงได้ปรับปรุงระบบสารสนเทศสำนวนคดีศาลชั้นต้น (CIMS) ให้รองรับการจัดเก็บรายละเอียดคดียาเสพติดที่ครอบคลุม ชัดเจนขึ้น และสอดรับกับประมวลกฎหมายยาเสพติด พ.ศ.2564

ศาลจังหวัดสุพรรณบุรีเป็นศาลชั้นต้น มีบทบาทสำคัญในการบังคับใช้ประมวลกฎหมายยาเสพติดดังกล่าว กระบวนการดำเนินงานเริ่มจาก เจ้าหน้าที่ศาลรับเอกสารการยื่นฟ้องจากพนักงานอัยการ ตรวจสอบและอ่านคำฟ้องเพื่อวิเคราะห์ฐานความผิดในคดียาเสพติด จากนั้นจึงบันทึกข้อมูลเข้าสู่ระบบ CIMS โดยแบ่งการจำแนกออกเป็น 2 ลำดับ ได้แก่ (1) ชนิดของยาเสพติด เช่น เฮโรอีน กัญชา หรือเมทแอมเฟตามีน และ (2) ลักษณะการกระทำผิด เช่น การเสพ การครอบครอง หรือการจำหน่าย ข้อมูลนี้มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการพิจารณาคดีและการวิเคราะห์สถิติคดีของศาลยุติธรรม และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหน่วยงานในกระบวนการยุติธรรม ศาลยุติธรรมได้ร่วมลงนามข้อตกลงความร่วมมือกับสำนักงานอัยการสูงสุด โดยเชื่อมโยงข้อมูลคดีผ่านระบบ CIMS (สำนักส่งเสริมงานตุลาการ, 2566) ทำให้เจ้าหน้าที่ศาลสามารถดาวน์โหลดไฟล์คำฟ้องอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบเอกสาร Word ได้ทันทีนอกเหนือจากเอกสารฉบับจริงแบบกระดาษ ซึ่งช่วยให้ศาลนำไฟล์ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นได้ แต่อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติด เจ้าหน้าที่ยังคงต้องอาศัยทักษะ ความชำนาญ และเวลาในการอ่านคำฟ้องที่มีรายละเอียดจำนวนมาก เพื่อวิเคราะห์ผลจำแนกตามเดิม ดัง Figure 1 ขณะที่จำนวนเจ้าหน้าที่มีจำกัดและต้องปฏิบัติงานอื่นควบคู่ไปด้วย เช่น การสอบคำให้การ การเบิกตัวผู้ต้องขัง และการรายงานคดี

จากการศึกษา พบว่าเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง และถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น โดยเฉพาะในด้านการจำแนกข้อความ ซึ่งสามารถลดภาระงานที่ต้องใช้เวลามากและงานที่ต้องการความแม่นยำสูงได้ดี (Naseeba *et al*., 2023)

ดังนั้น งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเพื่อจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติด โดยประยุกต์เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ใช้ข้อมูลจากไฟล์คำฟ้องในการฝึกแบบจำลองให้จำแนกฐานความผิดแบบลำดับขั้นตามระบบ CIMS พร้อมศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม 3 เทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงจากงานวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงเลือกกลยุทธ์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการจัดการความซับซ้อนของปัญหาการจำแนกชนิดยาเสพติดหลายชนิดและจำแนกลักษณะการกระทำความผิดที่อาจมีหลายความผิด เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถนำไปสนับสนุนการดำเนินงานของศาลยุติธรรมให้มีความรวดเร็วและเป็นระบบมากขึ้น ตามแนวคิดที่แสดงใน Figure 2

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง



Figure 1 Current process of narcotic case filing in court



Figure 2 Conceptual overview of automated narcotic case classification

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ระบบสารสนเทศสำนวนคดีศาลชั้นต้น (Court Information Management System: CIMS) เป็นโปรแกรมจัดการสำนวนคดีของศาลชั้นต้นทั่วประเทศ และรองรับการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงาน
2. การจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดเป็นการจัดประเภทความผิดอย่างเป็นระบบ แบ่งเป็น การจำแนกชนิดยาเสพติด (เช่น ยาบ้า ยาไอซ์ กัญชา) ซึ่งมีบทลงโทษต่างกัน และการจำแนกลักษณะการกระทำความผิด (เช่น ครอบครอง เสพ จำหน่าย ผลิต) โดยโทษพิจารณาร่วมกับชนิดยาเสพติด

พฤติกรรม และปริมาณ การจัดประเภทนี้ช่วยให้การพิจารณาคดีและการกำหนดบทลงโทษเป็นไปอย่างเหมาะสมและแม่นยำยิ่งขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกข้อความด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง พบเทคนิคที่หลากหลายสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่าง เช่น งานวิจัยของ วรวรรณ วันดี (2564) ซึ่งนำเสนอการจำแนกข้อความโดยใช้ชื่อเรื่องและสารบรรณของหนังสือ ภายใต้โครงสร้างการจำแนกแบบลำดับขั้น (Hierarchical Text Classification) ซึ่งแนวทางดังกล่าวสอดคล้องและเหมาะสมกับการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดจากไฟล์คำฟ้องอิเล็กทรอนิกส์ โดยแบ่งวิธีการจำแนกออกเป็นสองลำดับ ได้แก่ ลำดับแรก จำแนกชนิดของยาเสพติดในรูปแบบการจำแนกแบบหลายคลาส (Multi-class Classification) โดยอ้างอิงแนวทางของ เทวัญ เทียนวัน (2566) ซึ่งนำเสนอกลยุทธ์ One-vs-Rest (OvR) เพื่อแปลงปัญหาให้เป็นชุดการจำแนกสองคลาส และเลือกตัวจำแนกที่ให้คะแนนความมั่นใจสูงสุดมาใช้ในการตัดสินผลลัพธ์ ส่วนลำดับที่สอง จำแนกลักษณะการกระทำความผิดในรูปแบบการจำแนกแบบหลายป้าย (Multi-label Classification) โดยอาศัยวิธีการแปลงปัญหา (Problem Transformation Methods) ที่มีการนำเสนอโดย จินตรัย พุทธิพรชัย (2565) และ Morales-Hernández *et al*. (2022) เช่น กลยุทธ์ Classifier Chain เพื่อเชื่อมโยงและประเมินความสัมพันธ์ระหว่างป้ายในกระบวนการจำแนกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสมกับบริบทของงานวิจัยนี้ เช่น หากลำดับที่ 1 ทำนายชนิดยาเสพติดเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตยาเสพติด การเชื่อมโยงลำดับที่ 2 ก็จะมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่จะทำนายเป็นป้าย ผลิต หรือจำหน่าย ส่วนป้ายเสพ ก็จะมีโอกาสเป็นไปได้น้อย

นอกจากนี้ หลายงานวิจัยยังเน้นย้ำบทบาทของการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่ช่วยให้ระบบเข้าใจและจัดการข้อความได้อย่างมีประสิทธิภาพ (กัญญารัตน์ พูลเพิ่ม และแกมกาญจน์ สมประเสริฐศรี, 2565; Mahdi *et al*., 2024; Rizqi *et al*., 2025) โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วยการทำความสะอาดข้อมูล เช่น การลบอักขระพิเศษ อีโมจิ คำหยุด การสร้างคลังคำศัพท์และการตัดคำ ทั้งนี้ สุภัทธลักษณ์ โพธิ์หา (2565) และเทวัญ เทียนวรรณ (2566) ได้นำเสนอการใช้ไลบรารี PyThaiNLP ร่วมกับการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม newmm (ไพชยนต์ คงไชย, 2565) ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่รวดเร็วในการตัดคำภาษาไทย และขณะเดียวกัน การแปลงข้อความเป็นเวกเตอร์ด้วยการหาค่าน้ำหนักของคำตามความสำคัญด้วยเทคนิค Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) นั้นได้รับการยืนยันว่าเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของการจำแนกข้อความ ดังปรากฏในงานวิจัยของ Memoon *et al*. (2024) และ Sinha *et al*. (2022) นอกจากนี้ งานวิจัยของ ไพชยนต์ คงไชย (2565) ยังแสดงให้เห็นว่า แม้การเรียนรู้เชิงลึกจะมีความแม่นยำสูงกว่าเล็กน้อย แต่การเรียนรู้ของเครื่องยังคงมีประสิทธิภาพเพียงพอในการจำแนกข้อความที่ซับซ้อน และใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อยกว่ามาก

เมื่อพิจารณาจากข้อจำกัดด้านทรัพยากรและปริมาณข้อมูลในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกพัฒนาแบบจำลองด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับจากงานวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกข้อความที่ผ่านมา 3 เทคนิค ได้แก่ Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression และ Random Forest

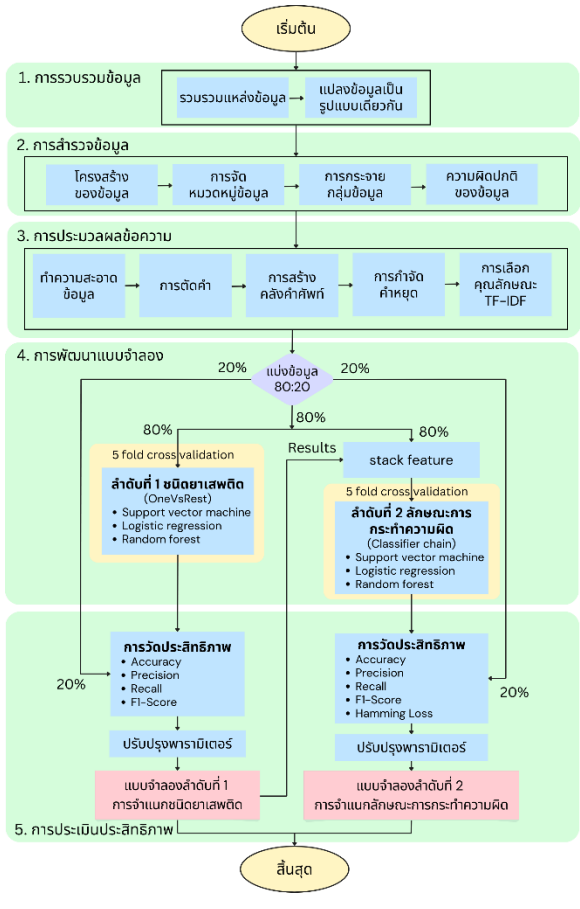


Figure 3 Overview of research methodology

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องผ่านการพัฒนา

โปรแกรมด้วยภาษา Python และไลบรารีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Docx2txt สำหรับแปลงไฟล์เอกสาร Word ให้เป็นข้อความ PyThaiNLP สำหรับการประมวลผลข้อความภาษาไทย และ Scikit-learn สำหรับการสร้างและประเมินแบบจำลอง กระบวนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดัง Figure 3 ได้แก่

1. การรวบรวมข้อมูล

เก็บข้อมูลจากระบบ CIMS ของศาลจังหวัดสุพรรณบุรี โดยเลือกคดียาเสพติดที่มีฐานความผิดเกี่ยวกับยาเสพติดชนิดเดียวต่อคดี เนื่องจากคดีที่มีข้อหายาเสพติดหลายชนิดพบจำนวนน้อย และการจำแนกลำดับที่ 1 (ชนิดยาเสพติด) มีผลต่อการจำแนกลำดับที่ 2 (ลักษณะการกระทำความผิด) เนื่องจากลักษณะคำตอบของป้ายแต่ละชนิดยาเสพติดมีความคล้ายคลึงกัน จึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณคดีที่เพียงพอในการจำแนกที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษารวบรวมระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2565 ถึง 31 พฤษภาคม 2567 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลคดียาเสพติดในรูปแบบไฟล์ JSON จำนวน 1 ไฟล์ มีข้อมูลคดี 1,651 ระเบียน ซึ่งได้คิวรี่และส่งออกไฟล์จากฐานข้อมูลโอราเคิลของระบบ CIMS

2) เอกสารคำฟ้องในรูปแบบไฟล์เวิร์ด (Word) จำนวน 1,651 ไฟล์ ดาวน์โหลดจากระบบ CIMS



Figure 4 Example of JSON data

Table 1 Description of attributes in the JSON file

Attribute name	Description
AGO_FILE_LINK	Document Link
ALLEGATION_NAME	Main charge
SUB_TYPE_NAME	Altemative charge



Figure 5 Example of file content in a narcotic case official document (Word)

จาก Figure 4 แสดงตัวอย่างข้อมูลคดีจากไฟล์ JSON ส่วน Table 1 สรุปคุณลักษณะของข้อมูล และ Figure 5 แสดงตัวอย่างเอกสารคำฟ้องจากไฟล์ Word

การรวมข้อมูลดำเนินการโดยใช้ไลบรารี Pandas อ่านข้อมูลคดีจากไฟล์ JSON และไลบรารี Docx2txt อ่านข้อความจากเอกสาร Word เพื่อแปลงและจัดเก็บข้อมูลเป็นดาต้าเฟรม (Data frame) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งข้อมูลทั้งสองผ่านรหัสชื่อไฟล์คำฟ้องและรหัส AGO_FILE_LINK ซึ่งประกอบด้วย 3คุณลักษณะสำคัญที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงใน Table 2

Table 2 Description of attributes in the data frame

Attribute name	Data source
DOCX_TEXT	Word (Text document)
LABEL_LEVEL1	JSON (ALLEGATION_NAME)
LABEL_LEVEL2	JSON (SUB_TYPE_NAME)

2. การสำรวจข้อมูล

ทำความเข้าใจลักษณะข้อมูลและตรวจสอบโครงสร้างและข้อมูลพื้นฐาน หมวดหมู่ และการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อหาข้อมูลที่ผิดปกติและความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล

```
print(label1_counts, label2_counts, label2_counts_multi, sep='\n\n')
```

```
LABEL_LEVEL1
ประมวลกฎหมายยาเสพติด (เมทแอมเฟตามีน)    1571
ประมวลกฎหมายยาเสพติด (กัญชา)              30
ประมวลกฎหมายยาเสพติด (เฮโรอีน)            28
ประมวลกฎหมายยาเสพติด (วัตถุออกฤทธิ์)     21
ประมวลกฎหมายยาเสพติด (ยาเสพติดอื่นๆ)      1
Name: count, dtype: int64

LABEL_LEVEL2
เสพ,จำหน่าย              509
ครอบครอง,เสพ             456
จำหน่าย                  237
เสพ                      150
ครอบครอง                 146
ครอบครอง,เสพ,จำหน่าย      63
เสพ,ครอบครองเพื่อเสพ      56
ครอบครอง,จำหน่าย          15
ผลิต,ครอบครอง             12
ครอบครองเพื่อเสพ           4
ผลิต,ครอบครอง,เสพ           2
ผลิต,เสพ                    1
Name: count, dtype: int64

เสพ                    1237
จำหน่าย                824
ครอบครอง               694
ครอบครองเพื่อเสพ        60
ผลิต                    15
Name: count, dtype: int64
```

Figure 6 Drug and offense breakdown in narcotic cases

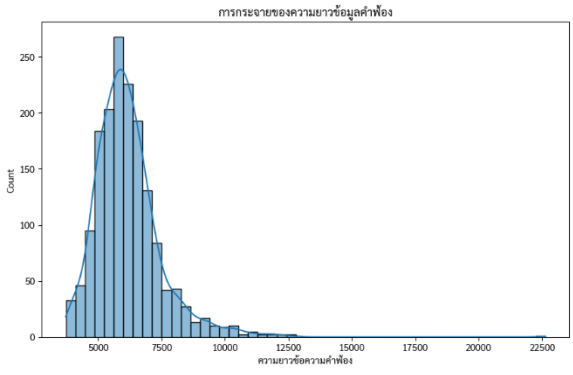


Figure 7 Distribution of text length across narcotic cases

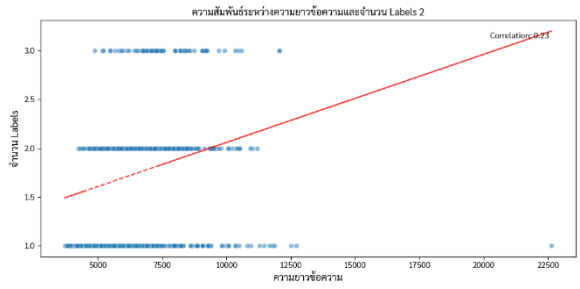


Figure 8 Correlation between data concentration and label group counts with outlier analysis

จาก Figure 6 ป้ายลำดับที่ 1 พบชนิดยาเสพติดแบ่งเป็น 5 หมวด โดยเมทแอมเฟตามีนมีจำนวนคดีมากที่สุด และหมวด “ยาเสพติดอื่น ๆ” มีเพียง 1 รายการไม่สามารถใช้วิเคราะห์ได้จึงถูกตัดออกเหลือ 4 หมวด คือ เมทแอมเฟตามีน กัญชา เฮโรอีน และวัตถุออกฤทธิ์ รวม 1,650 รายการ และลำดับที่ 2 ลักษณะการกระทำความผิด ซึ่งมีคำตอบแบบหลายป้าย พบการกระจายป้ายทั้งหมดมี 12 กลุ่ม โดยกลุ่มที่สูงสุดพบ 3 ป้ายต่อคดี และต่ำสุดที่ 1 ป้ายต่อคดี และหากจัดหมวดหมู่ของป้ายจะพบว่ามี 5 คลาสฐานความผิด ได้แก่ เสพ จำหน่าย ครอบครอง ครอบครองเพื่อเสพ และผลิต โดยประเภท “เสพ” พบมากที่สุด ส่วน “ผลิต” พบเพียง 15 รายการ จาก Figure 7 พบว่าข้อมูลคำฟ้องส่วนใหญ่ยาว 5,000–7,500 ตัวอักษร และมีคดียาวที่เกิน 10,000 ตัวอักษรเล็กน้อย และ Figure 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวข้อความกับจำนวนป้ายมีค่า Correlation = 0.23 ซึ่งอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง และพบ Outliers ในข้อความที่ยาวมากแต่มีจำนวนน้อยผู้วิจัยจึงไม่เลือกตัดข้อมูลเหล่านี้ออก ทั้งนี้พบข้อความรบกวน (Noise) ในข้อมูลดิบจำนวนมาก ได้แก่ อักษรภาษาอังกฤษที่ปะปนกับภาษาไทย ตัวเลขไทยผสมเลขอารบิก อักขระหรือสัญลักษณ์พิเศษ และคำที่ไม่สื่อความหมาย ดัง Figure 9

```
exam_raw = df['DOCX_TEXT'].iloc[1570]
exam_raw
```

```
'คำฟ้อง                                                
```

3. การประมวลผลข้อความ

การเตรียมข้อมูลภาษาไทยอาศัยกระบวนการประมวลผลภาษาธรรมชาติด้วยไลบรารี PyThaiNLP ซึ่งดำเนินการตามขั้นตอน ได้แก่

1) ทำความสะอาดข้อมูล ได้แก่ การแปลงเลขไทยเป็นเลขอารบิก การลบอักขระที่ไม่สื่อความหมาย

2) ตัดคำเพื่อแบ่งประโยคออกเป็นคำโดยใช้ฟังก์ชัน word_tokenization อัลกอริธึม newmm

3) สร้างคลังคำศัพท์เฉพาะด้วย custom_dict จากฟังก์ชัน word_tokenize เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตัดคำเฉพาะทางกฎหมายยาเสพติดและคำกำกวมสูง แสดงตัวอย่างดัง Figure 10, Figure 11 และ Figure 12

```
print("no whitespace:", word_tokenize(text, engine="newmm", keep_whitespace=False))
```

```
no whitespace: ['โจทก์', 'ฟ้อง', 'ว่า', 'เมื่อ', 'วันที่', '27', 'ต.ค.', '2564', 'เวลา', 'กลางคืน',
'ก่อนเที่ยง', 'จำเลย', 'ได้', 'จำหน่าย', 'โดย', 'การ', 'มี', 'ไว้', 'ใน', 'ครอบ', 'ครอบ', 'เพื่อ',
'จำหน่าย', 'ใน', 'ลักษณะ', 'เพื่อ', 'การค้า', 'ซึ่ง', 'เมท', 'แอมเฟตามีน', 'ชนิด', 'เกลือ', 'ใส',
'บรรจุ', 'ถุงพลาสติก', 'จำนวน', '1', 'ถุง', 'น้ำหนัก', '0.090', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น', 'น้ำหนัก',
'สาร', 'บริสุทธิ์', 'ได้', '0.071', 'กรัม', 'และ', 'ชนิดเมือ', 'สี่ส่ม', 'จำนวน', '1', 'ถุง', 'น้ำหนัก',
'10.560', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น', 'น้ำหนัก', 'สาร', 'บริสุทธิ์', 'ได้', '1.232', 'กรัม', 'และ', 'ชนิ
ด', 'เมือ', 'กลม', 'แบน', 'จำนวน', '160', 'เมือ', 'น้ำหนัก', '15.070', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น',
'น้ำหนัก', 'สาม', 'รบ', 'ริ', 'สุทธิ์', 'ได้', '1.8913', 'กรัม', 'รวมทั้ง', 'สาม', 'ชนิด', 'มี', 'น้ำหนั
ก', '25.720', 'กรัม', 'รวม', 'น้ำหนัก', 'สา', 'รบ', 'ริ', 'สุทธิ์', 'ได้', '3.1943', 'กรัม', 'ไว้',
'ใน', 'ครอบครอง', 'ของ', 'จำเลย', 'เพื่อ', 'จำหน่าย', 'มี', 'ลักษณะ', 'เพื่อ', 'การค้า', 'อันเป็น',
'การฝ่าฝืน', 'ต่อ', 'กฎหมาย', 'ขอให้', 'ลงโทษ', 'ตาม', 'ประมวลกฎหมาย', 'ยาเสพติด', 'ฯ']
```

Figure 10 Example of incorrect word segmentation

```
print("ตัดคำหลังเพิ่มคำศัพท์:", word_tokenize(text, engine="newmm", custom_dict=trie, keep_whitespace=False))
```

```
ตัดคำหลังเพิ่มคำศัพท์: ['โจทก์', 'ฟ้อง', 'ว่า', 'เมื่อ', 'วันที่', '27', 'ต.ค.', '2564', 'เวลา', 'กลางคืน', 'ก่อนเที่ยง',
'จำเลย', 'ได้', 'จำหน่าย', 'โดย', 'การ', 'มี', 'ไว้', 'ใน', 'ครอบ', 'ครอบ', 'เพื่อ', 'จำหน่าย', 'ใน', 'ลักษณะ',
'เพื่อ', 'การค้า', 'ซึ่ง', 'เมทแอมเฟตามีน', 'ชนิด', 'เกลือ', 'ใส', 'บรรจุ', 'ถุงพลาสติก', 'จำนวน', '1', 'ถุง', 'น้ำหนัก',
'0.090', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น', 'น้ำหนัก', 'สารบริสุทธิ์', 'ได้', '0.071', 'กรัม', 'และ', 'ชนิดเมือ', 'สี่ส่ม',
'จำนวน', '1', 'ถุง', 'น้ำหนัก', '10.560', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น', 'น้ำหนัก', 'สารบริสุทธิ์', 'ได้', '1.232', 'กรัม',
'และ', 'ชนิด', 'เมือ', 'กลม', 'แบน', 'จำนวน', '160', 'เมือ', 'น้ำหนัก', '15.070', 'กรัม', 'ตำนวล', 'เป็น', 'น้ำ
หนัก', 'สารบริสุทธิ์', 'ได้', '1.8913', 'กรัม', 'รวมทั้ง', 'สาม', 'ชนิด', 'มี', 'น้ำหนัก', '25.720', 'กรัม', 'รวม', 'น้
ำหนัก', 'สารบริสุทธิ์', 'ได้', '3.1943', 'กรัม', 'ไว้', 'ใน', 'ครอบครอง', 'ของ', 'จำเลย', 'เพื่อ', 'จำหน่าย', 'มี',
'ลักษณะ', 'เพื่อ', 'การค้า', 'อันเป็น', 'การฝ่าฝืน', 'ต่อ', 'กฎหมาย', 'ขอให้', 'ลงโทษ', 'ตาม', 'ประมวลกฎหมาย',
'ยาเสพติด', 'ฯ']
```

Figure 11 Example of improved word segmentation results after enhancing technical vocabulary

```
custom_dictword = pd.read_excel(oxlPath/'custom_dictwords.xlsx', sheet_name=0)
CustomWorDict = list(custom_dictword['DICT_WORD'].tolist())
print(CustomWorDict)
```

```
['สารบริสุทธิ์', 'เมทแอมเฟตามีน', 'ครอบครองเพื่อจำหน่าย', 'ครอบครองเพื่อเสพ', 'คีตามีน', 'ยาอี', 'แขว
ง', 'เฮโรอีน', 'กัญชา', 'กัญชง', 'สารระเหย', 'ยาเสพติด', 'ครอบครองโดย', 'ครอบครองซึ่ง', 'เสพวัตถุ',
'เสพยา', 'และเสพ', 'การค้า', 'ผลิต', 'เอ็กซ์ตาซี่', 'โคคาอีน', 'โคเคน', 'วัตถุออกฤทธิ์', 'ยาเสพติดอื่น',
'ประเภท1', 'ประเภท2', 'ประเภท5', 'ประเภท3', 'ประเภท4', 'บังอาจเสพ', 'ของกลาง', 'การลงโทษ',
'ออกประกาศ', 'เสพ', 'จำเลย', 'ไฮโดรคลอไรด์']
```

Figure 12 Example of technical vocabulary

4) กำจัดคำหยุด ลบคำที่ไม่มีผลต่อการจำแนกด้วย thai_stopwords แต่ได้ใช้วิธีเลือกเก็บคำหยุดบางคำที่มีบทบาทสำคัญต่อการจำแนกไว้เช่น “เพื่อ”, “และ”

5) แปลงข้อความเป็นเวกเตอร์เชิงปริมาณด้วย TF-IDF โดยคำนวณจากความถี่ของคำในเอกสาร (TF) และความเฉพาะของคำในเอกสารทั้งหมด (IDF) เพื่อเน้นคำน้ำหนักสำคัญและลดผลกระทบจากคำที่พบได้บ่อย ดังสมการที่ 1, 2 และ 3

$$\mathrm{TF-IDF}_{(t,d)} = \mathrm{TF} * \mathrm{IDF} \quad (1)$$

โดยที่

$$\mathrm{TF}_{(t,d)} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่คำ } t \text{ ปรากฏในเอกสาร } d}{\text{จำนวนครั้งที่คำ } t \text{ ปรากฏในเอกสาร } d} \quad (2)$$

$$\mathrm{IDF}_{(t)} = \log\left(\frac{N}{\mathrm{df}(t)}\right) \quad (3)$$

4. การพัฒนาแบบจำลอง

ข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลข้อความถูกแบ่งออกเป็นชุดฝึกฝนและชุดทดสอบในสัดส่วน 80:20 สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง โดยในกระบวนการพัฒนานี้ ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค 5-Fold Cross Validation เพื่อรับมือกับปัญหาความไม่สมดุลระหว่างคลาสของข้อมูล ชนิดยาเสพติดและลักษณะการกระทำความผิด โดยแบ่งชุดฝึกฝนออกเป็น 5 ส่วนเท่ากัน และดำเนินการฝึกและทดสอบ 5 รอบ โดยแต่ละรอบจะใช้ 4 ส่วนเป็นชุดฝึก และ 1 ส่วนเป็นชุดทดสอบ ซึ่งจะช่วยลดความเอนเอียงที่อาจเกิดจากการแบ่งข้อมูลเพียงครั้งเดียว เพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยการฝึกฝนแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ลำดับ ได้แก่

ลำดับที่ 1 การจำแนกชนิดยาเสพติด ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง 3 เทคนิค ได้แก่ SVM Logistic Regression และ Random Forest ร่วมกับวิธีการจำแนกประเภทแบบหลายคลาส กลยุทธ์ One-vs-Rest กับชุดข้อมูลฝึกฝน 80%

ลำดับที่ 2 การจำแนกลักษณะการกระทำความผิด พัฒนาแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องทั้ง 3 เทคนิค เช่นเดียวกับลำดับที่ 1 และวิธีการจำแนกประเภทแบบหลายป้าย กลยุทธ์ Classifier Chains โดยข้อมูลสำหรับการฝึกฝน ประกอบด้วยผลลัพธ์จากอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของการจำแนกลำดับที่ 1 และนำมาเป็นคุณลักษณะเชื่อมโยง (Linking feature) กับข้อมูลชุดฝึกฝน 80% โดยผนวกข้อมูลผ่านไลบรารี numpy ฟังก์ชัน hstack

5. การประเมินประสิทธิภาพ

5.1 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่ความเสถียรของผลการประเมิน และการลดอคติโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ 20% ซึ่งได้แยกออกไว้ตั้งแต่ต้นกระบวนการ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด จึงช่วยลดปัญหาการประเมินแบบลำเอียง (Bias) จากการเรียนรู้ล่วงหน้าได้ โดยทั้งสองลำดับดำเนินการวิเคราะห์ผลการทำนายกับค่าจริงจากตาราง Confusion matrix ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Confusion matrix

		Predicted	
		Positive (P)	
Actual	Negative (N)	TN	FP
	Positive (P)	FN	TP

จากตารางอาศัยค่าพื้นฐาน ได้แก่

True Positive (TP: ทำนายผลบวกถูกต้อง)

True Negative (TN: ทำนายผลลบถูกต้อง)

False Positive (FP: ทำนายผลบวกผิด)

False Negative (FN: ทำนายผลลบผิด)

เพื่อประเมินค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-Score โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP+TN}}{TP+FP+TN\_FN} \quad (4)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{TP+FP} \quad (5)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{TP+FN} \quad (6)$$

$$\text{F1} - \text{Score} = 2 * \frac{\text{Precision*Recall}}{\text{Precision+Rec}} \quad (7)$$

ทั้งนี้ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่ ค่าคะแนนของ F1-Score ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะข้อมูลที่มีการกระจายตัวไม่สมดุล เนื่องจากสามารถสะท้อนความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall ได้ดีกว่า Accuracy เพียงค่าเดียว (Naseeba *et al*., 2023) นอกจากนี้ ยังได้ประเมินค่าความแปรปรวนของผลลัพธ์ เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยการประเมินแบ่งเป็น 2 ลำดับ ได้แก่ (1) การจำแนกชนิดยาเสพติด และ (2) การจำแนกลักษณะการกระทำความผิด ทั้งนี้ ในลำดับที่ 2 ได้ประเมินค่าชี้วัด Hamming Loss ร่วมด้วย เพื่อวัดสัดส่วนของป้ายที่ทำนายผิดพลาด ซึ่งค่าจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าที่ใกล้เคียง 0 แสดงถึงความแม่นยำและประสิทธิภาพที่สูงของแบบจำลองในการจัดการกับข้อมูลหลายป้าย

5.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดจากงานของ Sinha *et al*. (2022) ซึ่งศึกษาเทคนิคการแปลงข้อความเป็นเวกเตอร์ด้วย TF-IDF ร่วมกับการปรับค่า N-gram พบว่าการเปลี่ยนขนาดของ N-gram มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยการกำหนดขนาดของกลุ่มคำในข้อความ เช่น N-gram (n_1, n_2) หมายถึง n_1 เป็นขนาดของแกรมเริ่มต้น และ n_2 เป็นขนาดของแกรมสูงสุด ตัวอย่างของ N-gram แต่ละขนาด ได้แก่

Unigram (N=1): [ครอบครอง], [เพื่อ], [เสพ]

Bigram (N=2): [ครอบครอง เพื่อ], [เพื่อ เสพ]

Trigram (N=3): [ครอบครองเพื่อเสพ]

จากตัวอย่างข้อมูล เห็นได้ว่า คำว่า “ครอบครองเพื่อเสพ” “ครอบครอง” และ “เสพ” ทางงานกฎหมายอาจมีความหมายการใช้งานที่แตกต่างหรือเป็นคนละคลาสกัน การเพิ่มขนาดของ N จะช่วยให้แบบจำลองเข้าใจความสัมพันธ์ของคำในข้อความได้ลึกซึ้งมากขึ้นและนำไปสู่การจำแนกประเภทข้อความที่แม่นยำขึ้น แต่ทั้งนี้จะส่งผลให้จำนวนคุณลักษณะ (Features) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การทดลองครั้งนี้ จึงใช้เทคนิคการลดมิติข้อมูลตามแนวทางของ เทวัญ เทียนวัน (2566) โดยอาศัยสถิติ Chi-square ช่วยคัดเลือกเฉพาะกลุ่มคำที่มีความสัมพันธ์กับคลาสของป้าย ซึ่งลดความซับซ้อนของข้อมูลโดยตัดคำที่มีคุณค่าน้อยออกไป การทดสอบดำเนินการผ่านกระบวนการ GridSearchCV จากไลบรารี Scikit-learn โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ngram_range ภายในฟังก์ชัน Tfid-fVectorizer() และใช้ฟังก์ชัน SelectKBest () ร่วมกับ Chi2 ในการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเรียนรู้ของแบบจำลอง การกำหนดช่วงพารามิเตอร์และตัวจำแนก แสดงดัง Table 4

5.3 การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วย Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve และ Area Under the Curve (AUC) ผ่านกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำนายค่าบวกถูกต้อง (True positive rate) และอัตราการทำนายค่าบวกผิดพลาด (False positive rate) ภายใต้ระดับ Threshold ต่าง ๆ แบบจำลองที่ดีจะมีเส้นโค้ง ROC เข้าใกล้มุมซ้ายบน และค่าพื้นที่ใต้กราฟ AUC สูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกประเภทได้อย่างแม่นยำ (เอกชัย ฉัตรพงศ์เลอเลิศ, 2567) การวิเคราะห์ค่า AUC จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพนี้

Table 4 Hyperparameter configurations for GridSearchCV

Models	TF-IDF (ngram-range)	Chi-2(k)	Classifier (C/n_estimators)
SVM	(1,1), (1,2), (1,3), (1,4)	500, 1000, 2000, 3000, 5000	C = 0.1, 1, 10
Logistic Regression	(1,1), (1,2), (1,3), (1,4)	500, 1000, 2000, 3000, 5000	C = 0.1, 1, 10
Random Forest	(1,1), (1,2), (1,3), (1,4)	500, 1000, 2000, 3000, 5000	n_estimators = 100, 200

ผลการวิจัย

1. ผลลัพธ์การจำแนกลำดับที่ 1 ชนิดยาเสพติด

ผลทดสอบจากการเปรียบเทียบ 3 เทคนิค แบ่งผลเป็น 1) พารามิเตอร์ตั้งต้น และ 2) ปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด จาก Figure 13 การทดลองแรกด้วยค่าตั้งต้นพบว่า SVM มีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกตัวชี้วัด ได้แก่ ค่า Accuracy 98.79%, Precision 97.90%, Recall 98.79% และ F1-Score 98.29% ซึ่งสูงกว่า Logistic Regression และ Random Forest ชัดเจน แต่หลังจากค่าปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด (N-gram (1,3), Chi-square (500) และ n_estimators = 100) พบว่าผลคะแนน Random Forest มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และสูงที่สุดในทุกตัวชี้วัด โดย Accuracy เพิ่มเป็น 99.70%, Precision 99.40%, Recall 99.70% และ F1-Score 99.55% ขณะที่ SVM มีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย ส่วน Logistic Regression ได้ค่าคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง และมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดในการทดลอง และจาก Figure 14 แสดงผลค่าความแปรปรวนของตัวชี้วัด โดยจากหลังปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด พบว่า Random Forest กลายเป็นโมเดลที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุดในทุกตัวชี้วัด ส่วน SVM มีความแปรปรวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ Logistic Regression มีความแปรปรวนสูงที่สุดในทั้งสองการทดลอง

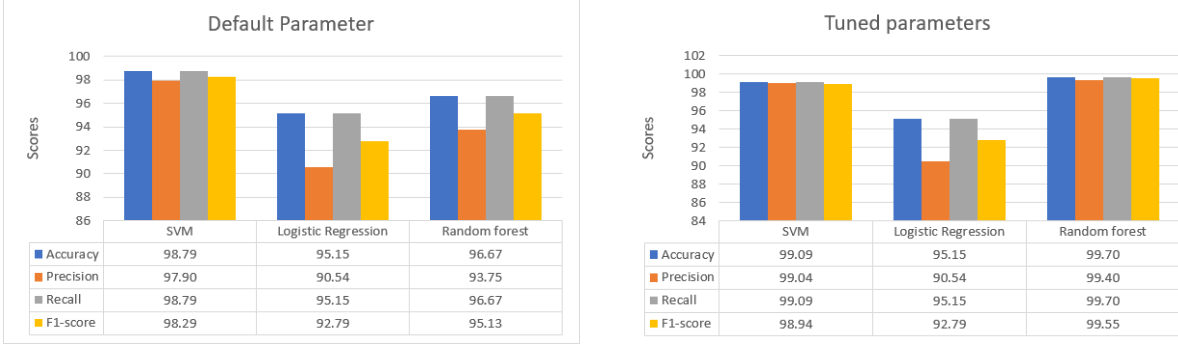


Figure 13 The results of comparison model performance evaluation (Level 1)

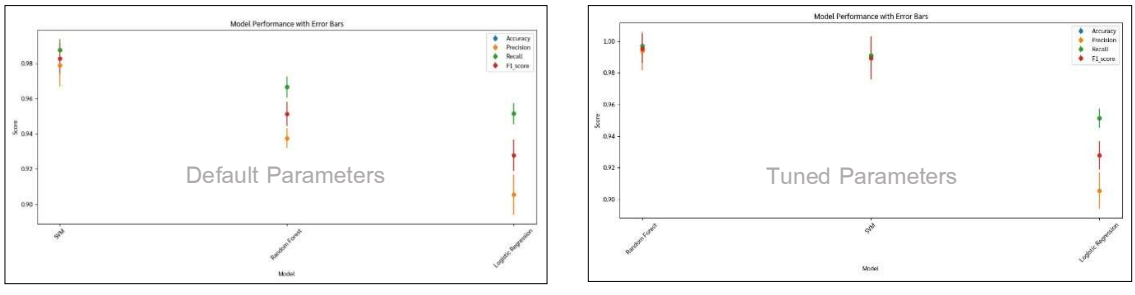
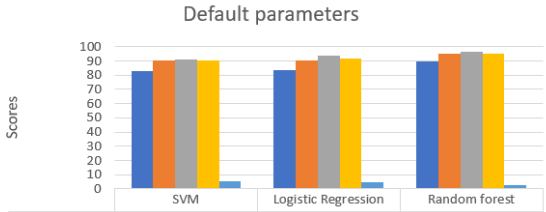


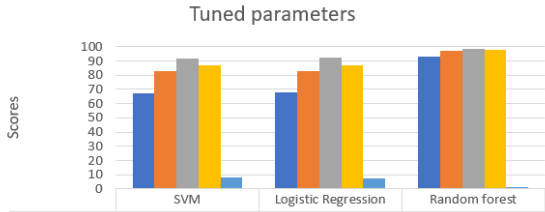
Figure 14 The results of comparison model stability evaluation (Level 1)

2. ผลลัพธ์การจำแนกลำดับที่ 2 ลักษณะการกระทำความผิด

ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมทั้ง 3 เทคนิค แบ่งผลเป็น 2 ครั้งเช่นกัน 1) พารามิเตอร์ตั้งต้น 2) ปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด จาก Figure 15 พบว่า Random Forest มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทดลองทั้งสองครั้ง โดยครั้งแรก พารามิเตอร์ตั้งต้น ให้ค่า Accuracy 89.70%, F1-Score 95.24%, Precision 94.93%, Recall 96.47% และค่า Hamming loss 0.279 และเมื่อปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด (N-gram (1,3), Chi-square (5000), n_estimators = 100) พบว่าครั้งที่สอง Random Forest มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยค่าคะแนน Accuracy สูงถึง 93.33%, F1-Score 97.70%, Precision 97.08%, Recall 98.57% และ Hamming loss ลดเหลือ 0.0158 ซึ่งให้ผลลัพธ์ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ Logistic Regression และ SVM โดยที่ Figure 16 แสดงผลการเปรียบเทียบความแปรปรวนพบว่าการทดลองเริ่มต้น Random Forest มีความแปรปรวนต่ำที่สุดทุกตัวชี้วัด และหลังปรับพารามิเตอร์ดีที่สุด Random Forest ยังคงมีความแปรปรวนต่ำที่สุดเช่นกัน ขณะที่ Logistic Regression มีความแปรปรวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน SVM มีค่าความแปรปรวนสูงสุดในทั้งสองการทดลอง



	SVM	Logistic Regression	Random forest
Accuracy	82.73	83.33	89.70
Precision	90.19	90.16	94.93
Recall	91.14	93.63	96.47
F1-score	90.44	91.73	95.24
Hamming Loss	5.12	4.48	2.79



	SVM	Logistic Regression	Random forest
Accuracy	66.97	67.88	93.33
Precision	83.01	82.74	97.08
Recall	91.68	92.72	98.57
F1-score	86.84	87.20	97.70
Hamming Loss	8.06	7.76	1.58

Figure 15 The results of comparison model performance evaluation (Level 2)

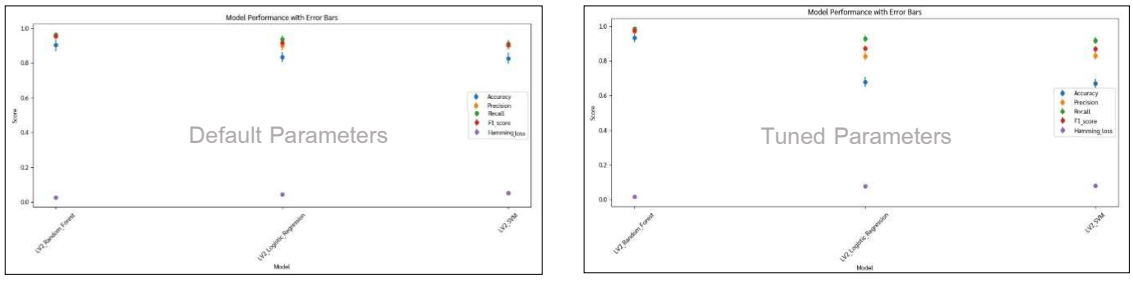


Figure 16 The results of comparison model stability evaluation (Level 2)

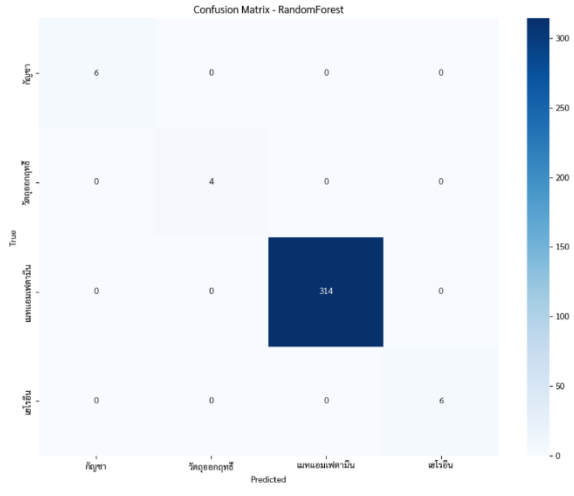


Figure 17 Confusion matrix of Random Forest (Level 1)

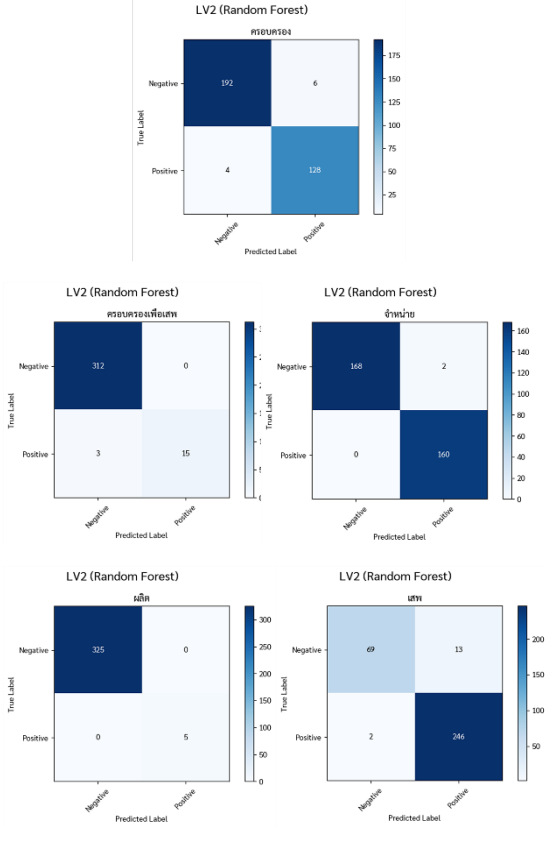


Figure 18 Confusion matrix of Random Forest (Level 2)

3. ผลลัพธ์การประเมิน Confusion matrix

จาก Figure 17 ผลการทดลองพบว่า Random Forest สามารถจำแนกลำดับที่ 1 ชนิดยาเสพติดได้ไม่มีผิดพลาด แสดงความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการจำแนกยาเสพติด 4 ชนิด แม้ข้อมูลมีความไม่สมดุล และ Figure 18 การจำแนกลำดับที่ 2 มีความแม่นยำเฉลี่ยสูง โดยพบข้อผิดพลาดเล็กน้อยในประเภท “เสพ” ที่มีผลทำนายคลาดเคลื่อน 13 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่สามารถระบุความผิดฐานเสพได้ถูกต้อง

4. ผลลัพธ์การประเมินประสิทธิภาพ ROC Curve และ AUC

จากการประเมินโมเดลโดยใช้ ROC และ AUC โดยที่ค่าของ AUC จะอยู่ระหว่าง 0 - 1 โดยที่ค่าใกล้ 1 หมายถึงโมเดลมีความแม่นยำสูง ซึ่งในการประเมินครั้งนี้โมเดลการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติด ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 มีค่า Micro-Average AUC เท่ากับ 1.0 (Figure 19 และ Figure 20) แสดงให้เห็นว่าโมเดลทั้งสองลำดับสามารถทำนายผลได้ในระดับที่ดีมาก ส่งผลต่อความเหมาะสมในการนำไปใช้ในสถาณการณ์จริง

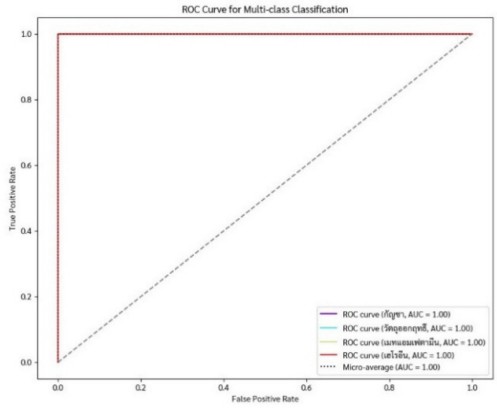


Figure 19 ROC performance of level 1 multi-label classifier

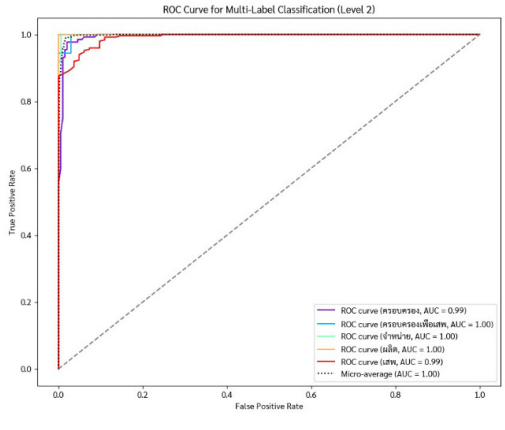


Figure 20 ROC performance of level 2 multi-label classifier

5. ผลลัพธ์การประยุกต์ใช้แบบจำลองผ่านเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบ

ผลการทดลองนำแบบจำลองไปใช้ในเชิงประยุกต์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบ โดยจัดเก็บโมเดลด้วยคำสั่ง joblib.dump() และส่งออกแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบการใช้งาน ซึ่งแอปพลิเคชันสามารถรับไฟล์เอกสารคำฟ้องในรูปแบบ Word เป็นข้อมูลนำเข้า และประมวลผลด้วยแบบจำลองที่ได้รับการฝึกฝน โดยแสดงผลการจำแนกชนิดของยาเสพติดและลักษณะการกระทำความผิดได้โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ผลการประมวลผลแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้อง มีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับผลการประเมินโมเดลจากการทดสอบเชิงสถิติ ดังแสดงใน Figure 21

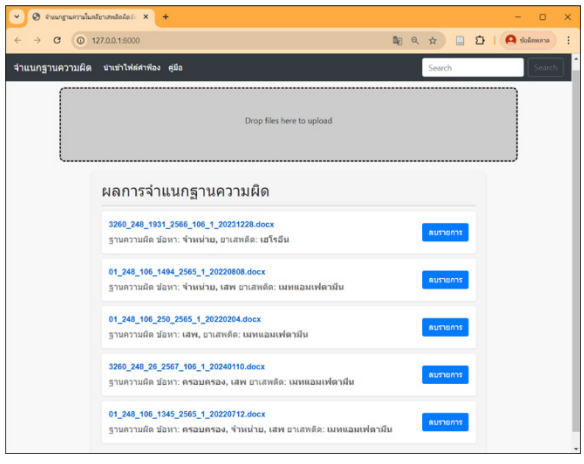


Figure 21 Sample in a simulated web application

ผลการศึกษาและอธิปรายผล

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้ของเครื่องเทคนิค Random Forest มีประสิทธิภาพและความเสถียรสูงในการจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติด ด้วยค่า F1-Score สูงกว่า 90% ทั้งในการจำแนกชนิดของยาเสพติด (99.55%) และลักษณะการกระทำความผิด (97.70%) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับรายงานของ กัญญารัตน์ พูลเพิ่ม และแกมกาญจน์ สมประเสริฐศรี (2565), Buntoro *et al*. (2021) และ Memoon *et al*. (2024)

การที่ Random Forest แสดงประสิทธิภาพสูงกว่าเทคนิคอื่น เช่น SVM และ Logistic Regression สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการจัดการข้อมูลซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการลด Overfitting ผ่านการเรียนรู้แบบหลายต้นไม้ ทั้งนี้ งานของ Buntoro *et al*. (2021) และ Costa *et al*. (2024) ยังชี้ว่ากลยุทธ์ Classifier Chain ช่วยเสริมประสิทธิภาพของ Random Forest ในงานจำแนกแบบหลายป้ายได้อย่างชัดเจน ขณะที่ SVM แม้เหมาะกับข้อมูลมิติสูง แต่

มีข้อจำกัดเมื่อต้องรับมือกับข้อมูลที่มี Noise หรือโครงสร้างซับซ้อน และ Logistic Regression มักประสบปัญหาเมื่อต้องจำแนกข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

กระบวนการเตรียมข้อมูลที่มีคุณภาพเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของแบบจำลองนี้ การใช้ไลบรารี PyThaiNLP ในการประมวลผลข้อความ ได้แก่ การตัดคำ การสร้างคลังคำศัพท์เฉพาะ การลบคำไม่สำคัญ และการแปลงข้อความเป็นเวกเตอร์ด้วยเทคนิค TF-IDF ร่วมกับการปรับพารามิเตอร์ N-gram และการคัดเลือกคุณลักษณะด้วยเทคนิค Chi-square แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ สุภัทธลักษณ์ โพธิ์หา (2565), เทวัญ เทียนวัน (2566) และ ไพชยนต์ คงไชย (2565) ที่ยืนยันประสิทธิภาพของ PyThaiNLP ในการเตรียมข้อมูลข้อความภาษาไทย ตลอดจนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sinha *et al*. (2022) ซึ่งสนับสนุนความเหมาะสมของการใช้เทคนิค TF-IDF ในการแปลงข้อความเพื่อการจำแนกที่รวดเร็วแม่นยำ

การใช้กลยุทธ์ที่เหมาะสม เช่น การจำแนกแบบลำดับขั้นที่สอดคล้องกับแนวทางของ วรวรรณ วันดี (2564) โดยลำดับแรก จำแนกชนิดของยาเสพติด ซึ่งเมทแอมเฟตามีนพบมากที่สุด โดยใช้กลยุทธ์ One-vs-Rest ซึ่งเหมาะกับข้อมูลหลายคลาสและไม่สมดุล สอดคล้องกับ เทวัญ เทียนวัน (2566) ส่วนลำดับที่สอง จำแนกลักษณะการกระทำความผิดโดยใช้กลยุทธ์ Classifier Chain นำผลจากลำดับแรกมาเป็นคุณลักษณะเสริม ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกหลายป้าย สอดคล้องกับงานของ จินตรัย พุทธิพรชัย (2565) และ Morales-Hernández *et al*. (2022)

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสามารถนำไปเป็นต้นแบบสำหรับประยุกต์ใช้ในกระบวนการยุติธรรม โดยเฉพาะการบูรณาการเข้ากับระบบสารสนเทศสำนวนคดีศาลชั้นต้น (CIMS) เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และจำแนกฐานความผิดในคดียาเสพติดจากไฟล์คำฟ้องที่จัดเก็บในรูปแบบเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันยังต้องอาศัยการอ่านและวิเคราะห์โดยเจ้าหน้าที่ศาล การนำแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงในการจำแนกชนิดของยาเสพติดและลักษณะการกระทำความผิดเข้ามาประยุกต์ใช้งาน จึงถือเป็นแนวทางที่สามารถลดภาระงานด้านการวิเคราะห์ข้อมูล เพิ่มประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการตรวจสอบเบื้องต้น ตลอดจนส่งเสริมการจัดเก็บข้อมูลคดีอย่างเป็นระบบและมีมาตรฐาน

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่าเทคนิค Random Forest มีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการประยุกต์ใช้ในวงกว้าง ควรขยายขอบเขตของข้อมูลโดยนำข้อมูลคดีจากศาลหรือแหล่งอื่นเข้ามาเพิ่มเติม อีกทั้งการวิเคราะห์ Learning Curve จะช่วยประเมินความเหมาะสมของขนาดข้อมูลและพฤติกรรมของแบบจำลองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การจัดการข้อมูลที่ไม่สมดุลด้วยเทคนิคเช่น SMOTE อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการจำแนกคลาสที่มีข้อมูลจำนวนน้อยได้มีประสิทธิภาพมากกว่า รวมถึงการพัฒนาในอนาคตอาจพิจารณาปรับปรุงโครงสร้างของแบบจำลองให้เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น หรือการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก เช่น LSTM หรือโมเดลภาษาอย่าง BERT เพื่อเสริมศักยภาพในการเข้าใจบริบทของข้อมูลที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานศาลยุติธรรมที่สนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณศาลจังหวัดสุพรรณบุรีที่อนุญาตให้ใช้ชุดข้อมูลจากโปรแกรมสารสนเทศสำนวนคดีศาลชั้นต้นสำหรับนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กัญญารัตน์ พูลเพิ่ม, และแกมกาญจน์ สมประเสริฐศรี. (2565). การจำแนกโครงการตามแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติโดยใช้เทคนิคเหมืองข้อความ. *วารสารวิชาการ การจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 9*(2), 54–65.

จินตรัย พุทธิพรชัย. (2565). *การจำแนกประเภทแบบหลายฉลากของบทความในฐานข้อมูลวารสารวิชาการไทยจากบทคัดย่อ* [ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). https://digital.car.chula.ac.th/chula-etd/6481

เทวัญ เทียนวรรณ. (2566). การประเมินข้อความทวิตเตอร์ที่เกี่ยวกับทัศนคติด้านสุขภาพในสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 เพื่อวิเคราะห์ความรู้สึกโดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอน. *วารสารเภสัชกรรมไทย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 16*(3), 769–786.

ประมวลกฎหมายยาเสพติด. (2564). ประมวลกฎหมายยาเสพติด พ.ศ. 2564. *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 138 ตอนที่ 73 ก, หน้า 1–80.

ไพชยนต์ คงไชย. (2565). การสร้างแบบจำลองโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อจำแนกข้อความการสนทนาจากแอปพลิเคชันไลน์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 43*(1), 16–24.

วรวรรณ วันดี. (2564). *การจำแนกประเภทแบบมัลติเลเบลสำหรับหัวเรื่องหนังสือทางบรรณารักษศาสตร์* [ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. Thammasat University Digital Collections. https://doi.org/10.14457/TU.the.2021.478

สำนักส่งเสริมงานตุลาการ. (2566, 27 ตุลาคม). *การเรียกข้อมูลจากสำนักงานอัยการสูงสุดเข้าสู่ระบบสารสนเทศสำนวนคดีศาลชั้นต้นโดยอัตโนมัติ*. สำนักงานศาลยุติธรรม. https://oja.coj.go.th/th/content/category/detail/id/21/iid/379504

สุภัทธลักษณ์ โพธิ์หา. (2565). *แบบจำลองวิเคราะห์ความรู้สึกผู้ใช้บริการที่มีต่อการให้บริการของโรงพยาบาลมาตรฐาน JCI ในประเทศไทย* [ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. Thammasat University Digital Collections. https://doi.org/10.14457/TU.the.2022.1519

เอกชัย ฉัตรพงศ์เลอเลิศ. (2567). *การจำแนกข้อความตามทฤษฎีการวิเคราะห์การสื่อสารสัมพันธ์ระหว่างบุคคลด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง* [ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. Thammasat University Digital Collections. https://doi.org/10.14457/TU.the.2024.52

Buntoro, G. A., Wibawa, A. D., & Purnomo, M. H. (2021). Text mining in healthcare for disease classification using machine learning algorithm. *IEEE Access*, *9*, Article 9593998. https://doi.org/10.1109/IES53407.2021.9593998

Costa, J. A. F., Silva, S. O., Silva, E. D. S. A., & Dantas, N. C. D. (2024). Multi-label classification of legal cases according to the Sustainable Development Goals using machine learning algorithms. In *2024 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/LA-CCI62337.2024.10814740

Mahdi, Z. M., Istiqomah, R. F., Alfarelzi, Astuti, S., Asror, I., & Mayasari, R. (2024). Text classification using NLP by comparing LSTM and machine learning method. In *2024 10th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICWT62080.2024.10674679

Memoon, M., Umar, M., Rani, S., Khalid, M., & Shaheen, S. (2024). Twitter news classification using machine learning. In *2024 International Conference on Engineering & Computing Technologies (ICECT)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICECT61618.2024.10581173

Morales-Hernández, R. C., Gutiérrez Jagüey, J., & Becerra-Alonso, D. (2022). A comparison of multi-label text classification models in research articles labeled with sustainable development goals. *IEEE Access*, *10*, 123534–123547. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223094

Naseeba, B., Challa, N. P., Doppalapudi, A., Chirag, S., & Nair, N. S. (2023). Machine learning models for news article classification. In *2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSSIT55814.2023.10061095

Rizqi, F. N., Bijaksana, M. A., & Bunyamin. (2025). Multi-label classification of Al-Qur'an verses using ensemble method and BERT. In *2025 International Conference on Advancement in Data Science, E-learning and Information System (ICADEIS)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICADEIS65852.2025.10933388

Sinha, A., Nazma, M., Naskar, B. J., Pandey, M., & Rautaray, S. S. (2022). IMDB movie review text classification model using different weighting techniques and classifiers. In *2022 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/OCIT56763.2022.00029

การวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อระบุบุคคลไทยที่มีความเสี่ยงสูงต่อความรุนแรงในครอบครัวและปัญหาสุขภาพจิต โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

Data clustering analysis to identify high-risk Thai individuals for domestic violence and mental health problems using machine learning

วุฒิพงษ์ เขื่อนดิน และชนิดา แก้วเพชร[1*]

Wutthiphong Khuandin[1] and Chanida Kaewphet[1*]

Received: 17 March 2025 ; **Revised**: 8 May 2025 ; **Accepted**: 13 June 2025

บทคัดย่อ

จากสถานการณ์ความรุนแรงในครอบครัวและปัญหาสุขภาพจิตในประเทศไทยยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตและความมั่นคงของสังคม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงวิกฤตเศรษฐกิจและการแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของเหตุการณ์ความรุนแรงภายในครอบครัว อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังขาดการวิเคราะห์เชิงลึกโดยใช้เทคนิควิทยาการข้อมูลเพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูง การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลไทยที่มีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาสุขภาพจิตและความรุนแรงในครอบครัว โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ด้วยวิธีการจัดกลุ่มข้อมูลแบบไม่มีการกำกับ (Unsupervised Learning) ได้แก่ K-means, Hierarchical Clustering (HC) และ Gaussian Mixture Models (GMMs) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิคด้วยตัวชี้วัดภายในเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการแยกกลุ่มความเสี่ยง การวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลผู้กระทำความรุนแรงในครอบครัวจำนวน 1,162 รายการที่ได้จากแหล่งข้อมูลสาธารณะ สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (DGA) ผลการวิเคราะห์พบว่า HC มีประสิทธิภาพดีที่สุด (Silhouette Score = 0.429, Calinski-Harabasz Index = 61.790, Davies-Bouldin Index = 1.034) สามารถจำแนกกลุ่มความเสี่ยงได้ชัดเจน โดยกลุ่มเสี่ยงสูงมีลักษณะสำคัญคือ เพศชาย อายุช่วงวัยกลางคน มีปัญหาสุขภาพจิต มีการใช้สารเสพติด และความเครียดทางเศรษฐกิจ ผลการวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกกลุ่มเสี่ยงเพื่อสนับสนุนการออกแบบมาตรการป้องกันเฉพาะกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการศึกษาไปพัฒนาระบบแจ้งเตือนความเสี่ยงเชิงป้องกันหรือวางแผนเชิงนโยบายเพื่อป้องกันความรุนแรงในครอบครัวและส่งเสริมสุขภาพจิตของประชาชนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สุขภาพจิต, ความรุนแรงในครอบครัว, การจัดกลุ่มข้อมูล

Abstract

Domestic violence and mental health problems remain critical public health concerns in Thailand, with an increasing prevalence observed during economic crises and the COVID-19 pandemic. Despite their significant societal impact, previous research has lacked in-depth analytical approaches utilizing data science to identify high-risk populations. This study aims to classify high-risk Thai individuals vulnerable to mental health issues and domestic violence by applying unsupervised machine learning techniques, specifically K-means, Hierarchical Clustering (HC), and Gaussian Mixture Models (GMMs). Internal evaluation metrics, including the Silhouette Score, Calinski-Harabasz Index, and Davies-Bouldin Index, were used to assess clustering performance. The dataset comprised 1,162 records of domestic violence offenders obtained from the Digital Government Development Agency (DGA) in Thailand.

[1] สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

[1] Major of Information System and Business Computer, Faculty of Business Administration and Information Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding author; E-mail: chanida.k@rmutsb.ac.th

The findings indicate that HC achieved the highest performance (Silhouette Score = 0.429, Calinski-Harabasz Index = 61.790, and Davies-Bouldin Index = 1.034), effectively differentiating risk groups. The high-risk group was predominantly characterized by middle-aged males with mental health issues, substance abuse, and economic stress. This study demonstrates the potential of machine learning for identifying vulnerable populations. It provides insights that can inform the development of targeted prevention strategies, early warning systems, and evidence-based policymaking to mitigate domestic violence and promote sustainable mental well-being.

Keywords: Mental health, domestic violence, data clustering

บทนำ

องค์การอนามัยโลกพบว่าความรุนแรงของคู่สมรสและการใช้ความรุนแรงในครอบครัวเป็นปัญหาสุขภาพ ปัญหาทางสังคมและปัญหาด้านสาธารณสุขที่สำคัญทั่วโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายและจิตใจของผู้ที่ตกเป็นเหยื่อ (World Health Organization, 2024) โดยสถานการณ์การระบาดของโรค COVID-19 ส่งผลกระทบต่อภาวะเศรษฐกิจและสังคม ทำให้หลายครอบครัวมีรายได้ลดลง เกิดความเครียดและเสี่ยงต่อการใช้ความรุนแรงในครอบครัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ชีวิตประจำวันอย่างกะทันหัน การทำงานที่บ้าน การตกงาน และการกักตัว ทำให้สมาชิกในครอบครัวมีโอกาสอยู่ร่วมกันมากขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่ความขัดแย้งและความรุนแรงได้ง่ายขึ้น เหยื่อส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (85%) มีอายุระหว่าง 36-59 ปี (45%) มีความสัมพันธ์กับผู้กระทำในฐานะคู่สมรส (60%) และผู้กระทำไม่ได้ใช้สารเสพติด (70%) ไม่มีปัญหาสุขภาพจิต (65%) ไม่มีปัญหาการพนัน (80%) และไม่มีปัญหาเศรษฐกิจ (75%) นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่าส่วนใหญ่เคยถูกกระทำความรุนแรงในครอบครัวอย่างน้อย 1 ครั้ง (70%) โดยรูปแบบความรุนแรงที่พบบ่อยที่สุดคือ ความรุนแรงทางร่างกาย (60%) รองลงมาคือ ความรุนแรงทางจิตใจ (50%) และความรุนแรงทางเพศ (30%) และสำหรับประเทศไทยในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรค COVID-19 ความรุนแรงในครอบครัวที่เกิดขึ้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงก่อนการระบาด โดยจากการสำรวจในช่วงการระบาดครั้งที่ 1 (มกราคม - พฤษภาคม 2563) พบว่า ความรุนแรงในครอบครัวมีความชุกอยู่ที่ 42.9% และแม้จะลดลงเล็กน้อยเหลือ 37.4% ในช่วงการระบาดครั้งที่ 2 (กรกฎาคม 2563 - มกราคม 2564) แต่ยังถือว่าสูงกว่าอัตราความรุนแรงในครอบครัวก่อนเกิดการระบาดซึ่งอยู่ที่ 26% สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบทางเศรษฐกิจและความเครียดในครอบครัวอันเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดความรุนแรงในครอบครัวในช่วงวิกฤตโรคระบาด (พิทยา สังข์แก้ว และคณะ, 2565)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังขาดการประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดกลุ่มข้อมูลเชิงลึก เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงของความรุนแรงในครอบครัวในบริบทของประเทศไทย แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมความรุนแรงบ้างแล้ว แต่ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติพื้นฐานโดยไม่ได้ใช้เทคนิคเชิง Machine Learning (ML) เพื่อจำแนกกลุ่มเสี่ยงอย่างเป็นระบบ (อรรคพล ดำเนินผล, 2564) นอกจากนี้ ยังมีจำนวนน้อยมากที่ใช้ข้อมูลจริงจากฐานข้อมูลสาธารณะเพื่อสร้างแบบจำลองการประเมินความเสี่ยงอย่างเป็นรูปธรรม ในประเทศไทยสำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล, 2567) ได้เผยแพร่ข้อมูลเปิดเกี่ยวกับผู้กระทำความรุนแรงในครอบครัว ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลที่มีคุณค่าในการนำมาศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบปัจจัยเสี่ยงเพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีแนวโน้มในการก่อความรุนแรง ข้อมูลนี้ประกอบด้วยรายละเอียดด้านประชากรศาสตร์ พฤติกรรมเสี่ยง สถานะทางจิตใจ และปัจจัยเศรษฐกิจ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคทางวิทยาการข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองที่แม่นยำในการระบุความเสี่ยง

ความสำคัญของงานวิจัยนี้คือการประยุกต์ใช้ Machine Learning ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงของบุคคลที่มีแนวโน้มก่อความรุนแรงในครอบครัวแบบดั้งเดิมมักใช้วิธีการสถิติพื้นฐาน เช่น การวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งถึงแม้จะสามารถระบุความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดหลายด้าน ได้แก่ (1) ไม่สามารถค้นหารูปแบบที่ซับซ้อนได้ วิธีการเชิงสถิติอาจไม่สามารถแยกแยะความสัมพันธ์เชิงซ้อนของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดีเท่ากับ Machine Learning (2) ความสามารถในการปรับตัว เนื่องจากสามารถเรียนรู้จากข้อมูลใหม่ ๆ และสามารถปรับปรุงความแม่นยำได้โดยอัตโนมัติ และสุดท้ายคือการจัดกลุ่มข้อมูลโดยไม่ต้องมีข้อมูลป้ายกำกับ (Unsupervised Learning) เป็นเทคนิคการจัดกลุ่มช่วยให้สามารถจำแนกกลุ่มความเสี่ยงได้แม้ไม่มีข้อมูลป้ายกำกับล่วงหน้า

จากข้อได้เปรียบข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Machine Learning แบบ Unsupervised Learning ได้แก่ K-means,

Hierarchical Clustering (HC) และ Gaussian Mixture Models (GMMs) เพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงและสามารถนำไปใช้พัฒนามาตรการป้องกันในเชิงนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ณัฐวุฒิ แถมเงิน และคณะ, 2567) และมีจุดมุ่งหมาย เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยการนำเทคนิคการจัดกลุ่มข้อมูลทั้งสามรูปแบบมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจัดกลุ่ม พร้อมประเมินด้วยดัชนีที่ได้รับการยอมรับ เช่น Silhouette Score, Calinski-Harabasz Index และ Davies-Bouldin Index เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการกำหนดนโยบายและมาตรการป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ (1) เพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงต่อการใช้ความรุนแรงในครอบครัวและปัญหาสุขภาพจิตด้วยการจัดกลุ่มข้อมูลแบบ Unsupervised Learning และ (2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการจัดกลุ่มแต่ละแบบโดยใช้เกณฑ์การประเมินโมเดล เพื่อเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการแยกกลุ่มความเสี่ยง การศึกษานี้คาดว่าจะมีส่วนช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถใช้ข้อมูลเชิงลึกในการออกแบบแผนการแทรกแซงอย่างเหมาะสมกับแต่ละกลุ่มความเสี่ยง เพื่อป้องกันและลดปัญหาความรุนแรงในครอบครัวได้อย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

ประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน (Figure 1) ดังนี้

1. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือข้อมูลผู้กระทำความรุนแรงในครอบครัว จำแนกตามปัญหาหรือสาเหตุรายประเด็น ที่เผยแพร่รูปแบบสาธารณะในเว็บไซต์ของสำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) (สพร.) ในกลุ่มชุดข้อมูลสังคมและสวัสดิการ ตั้งแต่วันที่ 28 มีนาคม 2567 ถึง 24 กุมภาพันธ์ 2568 จำนวน 1,162 รายการ จากเว็บไซต์ https://data.go.th/ สืบค้นเมื่อ 17 มกราคม 2568 สำหรับการนำข้อมูลเข้า ผู้วิจัยทำการดาวน์โหลดข้อมูลจากเว็บไซต์ ซึ่งข้อมูลถูกจัดเก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ csv โดยใช้ไลบรารี pandas ในภาษา Python

2. การเตรียมข้อมูล (Data preparation)

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและทำให้ข้อมูลพร้อมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล (Georgiou, 2024) ผู้วิจัยเลือกใช้ scikit-learn ในภาษา Python

การคัดเลือกแอตทริบิวต์ที่เป็นการพิจารณาความถูกต้อง ครบถ้วนของแต่ละข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพราะว่าข้อมูลที่เลือกนำมาใช้มีค่าในแต่ละแอตทริบิวต์เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) จากข้อมูลทั้งหมด 1,162 รายการ 19 แอตทริบิวต์ ผู้วิจัยพิจารณาเลือกใช้ปัจจัยสำหรับจำแนกกลุ่มจำนวน 12 แอตทริบิวต์

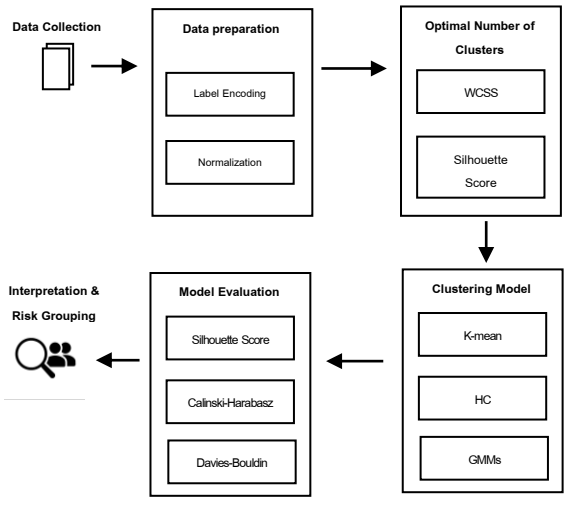


Figure 1 Cluster Analysis Pipeline

จากการศึกษาข้อมูลเชิงสถิติจาก Table 1 พบว่าปัจจัยเสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพจิตและความรุนแรงในครอบครัวของคนไทยสามารถจำแนกออกเป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ ปัจจัยด้านประชากรศาสตร์ พบว่าผู้ก่อเหตุเป็นชายและหญิงในสัดส่วนใกล้เคียงกัน โดยมีอายุเฉลี่ย 38.32 ปี สะท้อนว่าปัญหานี้สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกเพศและวัยกลางคนเป็นช่วงที่พบมากที่สุด ปัจจัยพฤติกรรมเสี่ยง การดื่มแอลกอฮอล์ และการใช้สารเสพติด เป็นปัจจัยที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมรุนแรงและปัญหาสุขภาพจิตอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปัจจัยด้านครอบครัวและอารมณ์ พบว่าความโกรธที่รุนแรง และความหึงหวงมีความเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมความรุนแรง ขณะที่การหย่าร้างไม่ใช่ปัจจัยสำคัญ ปัจจัยด้านสุขภาพและปัญหาสุขภาพจิตมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมเสี่ยงมากกว่าสุขภาพกาย การติดการพนันพบน้อยมากที่สุดในปัจจัยทั้งหมด และสุดท้ายคือปัจจัยด้านเศรษฐกิจ ความเครียดทางเศรษฐกิจอาจเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปัญหาภายในครอบครัวและภาวะทางจิตที่นำไปสู่ความรุนแรงได้เช่นกัน

2.1 การแปลงข้อมูลประเภทหมวดหมู่ให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขด้วยวิธี LabelEncoder ซึ่งเป็นเครื่องมือ ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องได้ง่ายขึ้น (Hasan *et al*., 2020)

2.2 การจัดการข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะกับการใช้งาน ด้วยการใช้พารามิเตอร์ MinMaxScaler ทำ Normalize เพื่อให้ข้อมูลทุกตัวแปรอยู่ในช่วง 0 - 1 ช่วยลดผลกระทบจากสเกลที่ไม่เท่ากันในโมเดลที่อิงกับระยะห่าง เพราะงานวิจัยนี้ใช้โมเดล K-means, HC และ GMMs ซึ่งจะ

คำนวณระยะห่างสำหรับจัดกลุ่ม เพื่อให้ผลลัพธ์ของการจัดกลุ่มมีความแม่นยำมากขึ้น

Table 1 Risk and Demographic Profiles

Factor	Data Proportion
Gender	Female: 581 (50.04%), Male: 578 (49.78%), Not specified: 2 (0.17%)
Age	Average age: 38.32 years
Alcohol	Alcohol consumption: 788 (67.87%), No alcohol consumption: 378 (32.13%)
Drug Use	Drug use: 728 (62.70%), No drug use: 433 (37.30%)
Authoritative Behavior	Present: 301 (25.93%), Not present: 860 (74.07%)
Rage	Present: 820 (70.63%), Not present: 341 (29.37%)
Jealousy	Present: 239 (20.59%), Not present: 922 (79.41%)
Divorce	Not divorced: 1,123 (96.73%), Divorced: 38 (3.27%)
Health Problems	No health problems: 1,123 (96.73%), Health problems: 38 (3.27%)
Mental Health Problems	No mental health problems: 975 (83.98%), Mental health problems: 186 (16.02%)
Gambling Addiction	Not addicted: 1,135 (97.76%), Addicted: 26 (2.24%)
Economic Stress	No stress: 1,008 (86.82%), Economic stress: 153 (13.18%)

3. การวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Number of Clusters)

เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดจำนวนกลุ่ม (k) ที่เหมาะสมที่สุดในการจัดกลุ่มข้อมูล โดยไม่มากหรือน้อยเกินไปส่งผลต่อคุณภาพของการจัดกลุ่ม ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีดังนี้

3.1 Elbow Method เป็นกระบวนการวิเคราะห์เพื่อเลือกจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุดในงานจัดกลุ่มข้อมูล โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ใน K-means clustering (BuiltIn, 2024) วิธีการนี้อาศัยการคำนวณค่า Within-Cluster Sum of Squares (WCSS) หรือค่า Sum of Squared Errors (SSE) ดังสมการที่ (1) ซึ่งเป็นผลรวมของระยะทางกำลังสองระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับ centroid ของกลุ่มที่ข้อมูลนั้นสังกัดอยู่ (Analytics Vidhya, 2021) จากนั้นทำการวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า WCSS และจำนวนกลุ่มที่กำหนด เพื่อค้นหาจุดที่การลดลงของ WCSS เริ่มชะลอตัวหรือจุดหักศอก(GeeksforGeeks, 2020) จุดดังกล่าวสะท้อนถึงจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการเพิ่มจำนวนกลุ่มหลังจากจุดนี้จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพการจัดกลุ่มดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกต่อไป และได้ผลการคำนวณค่าดัง Figure 2 (a) พบว่าจำนวนกลุ่มที่ดีที่สุดคือ 3 กลุ่ม

$$WCSS = \sum_{k=1}^{K} \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (1)$$

โดยที่:

K คือ จำนวนกลุ่มทั้งหมดที่กำหนด

C_k คือ เซตของข้อมูลในกลุ่มที่ k

x_i คือ เวกเตอร์ของจุดข้อมูลลำดับที่ i

μ_k คือ เวกเตอร์ของจุดศูนย์กลางของกลุ่มที่ k

$\|\cdot\|$ คือ ระยะทางปกติระหว่างจุดสองจุดในแนวเส้นตรง (Euclidean Distance)

3.2 หาค่าเฉลี่ย Silhouette เป็นตัวชี้วัดการจัดกลุ่มข้อมูลที่ประเมินความใกล้เคียงระหว่างข้อมูลในกลุ่มเดียวกันกับข้อมูลในกลุ่มอื่น ๆ ดังสมการที่ (2) งานวิจัยนี้เลือกใช้พารามิเตอร์ silhouette_score โดยมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 สำหรับค่าใกล้ 1 หมายถึงการจัดกลุ่มที่ดี โดยข้อมูลภายในกลุ่มมีความคล้ายคลึงกันมากและข้อมูลต่างกลุ่มมีความแตกต่างกันมาก สำหรับค่าใกล้ -1 หมายถึงการจัดกลุ่มที่ไม่ดี โดยข้อมูลภายในกลุ่มมีความคล้ายคลึงกันน้อยและข้อมูลต่างกลุ่มมีความคล้ายคลึงกันมาก (Wang *et al*., 2017, scikit-learn developers, 2023) ดัง Figure 2 (b) พบว่าจำนวนกลุ่มที่เท่ากับ 3 มีค่าที่ใกล้เคียงค่า 1 มากที่สุด

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\left(a(i), b(i)\right)} \quad (2)$$

โดยที่

$s(i)$ คือ Silhouette Score ของจุดข้อมูล i ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1

$a(i)$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง (Distance) ระหว่างจุดข้อมูล i กับจุดข้อมูลอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (intra-cluster distance)

$b(i)$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง ระหว่างจุดข้อมูล i กับจุดข้อมูลในกลุ่มที่ใกล้ที่สุด (nearest other cluster) ซึ่งจุดข้อมูล i ไม่ได้เป็นสมาชิก

หาก $s(i) \approx 1$ คือ การจัดกลุ่มมีความแม่นยำสูง จุด i อยู่ใกล้กับจุดในกลุ่มเดียวกันและห่างจากจุดในกลุ่มอื่น

$s(i) \approx 0$ คือ จุด i อยู่บริเวณขอบเขตของกลุ่มใกล้กับกลุ่มอื่นพอสมควร

$s(i) \approx -1$ คือ การจัดกลุ่มที่ขาดความแม่นยำ จุด i ใกล้กับจุดในกลุ่มอื่นมากกว่ากลุ่มของตัวเอง

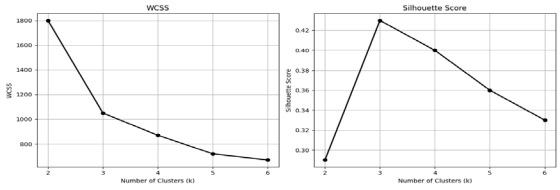


Figure 2 WCSS and Silhouette Score by Number of Clusters (k)

4. การสร้างแบบจำลองเพื่อจัดกลุ่ม (Clustering Model)

เป็นขั้นตอนที่จะนำข้อมูลที่ถูกเตรียมไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า เข้าสู่กระบวนการสร้างโมเดลเพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาสุขภาพจิตและปัญหาความรุนแรงในจากขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุดก่อนหน้านี้ จึงกำหนดให้ k = 3 เนื่องจากเป็นค่าที่ดีที่สุดที่สามารถแยกแยะกลุ่มความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.1 K-means Clustering มีหลักการทำงานแบบวนซ้ำเพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะความใกล้เคียงกันของข้อมูล (Supakorn, 2021) มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในด้านต่างๆ เช่น นำเสนอการประยุกต์ใช้ K-Means ร่วมกับ SVM เพื่อพยากรณ์ภาวะเบาหวาน (Arora *et al*., 2022) การดำเนินงานของ K-means (Rizman Žalik & Žalik, 2023) มีขั้นตอนสำคัญดังนี้ (1) กำหนดจำนวนกลุ่มล่วงหน้า ดังนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์ n_clusters = 3 (2) สุ่มเลือกจุดศูนย์กลางเริ่มต้นของแต่ละกลุ่ม ทำการสุ่มเลือกข้อมูลจำนวน 3 จุดจากชุดข้อมูลทั้งหมดเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้น (Initial Centroids) ของแต่ละกลุ่ม และใช้พารามิเตอร์ init='k-means++' วิธีการนี้โมเดลจะค่อย ๆ เลือกจุด Centroid ทีละจุดโดยใช้หลักการว่า จุดใหม่ควรอยู่ห่างจาก Centroid ที่เลือกไว้ก่อนหน้าให้มากที่สุด Centroid ที่ได้จะกระจายตัวได้ดีตั้งแต่ต้น ช่วยให้กลุ่มสุดท้ายมีคุณภาพดีกว่า และลดจำนวนรอบที่ต้องรัน K-means ลง จากนั้นกำหนดค่า n_init=10 เป็นการกำหนดจำนวนครั้งที่โมเดล K-means จะสุ่มจุดเริ่มต้น แล้วเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือที่มี WCSS ต่ำที่สุดและเป็นค่าที่ทดลองแล้วว่าให้ผลลัพธ์ที่เสถียรในหลายกรณี (3) จัดกลุ่มข้อมูลตามความใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลาง โดยการคำนวณระยะทางระหว่างข้อมูลแต่ละจุดกับจุดเริ่มต้นของแต่ละกลุ่ม โดยปกติมักใช้ระยะทางแบบ Euclidean Distance ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3) แล้วทำการจัดกลุ่มข้อมูลให้เป็นสมาชิกของกลุ่มที่มีจุดศูนย์กลางใกล้ที่สุด

$$d\left(x_i,\mu_k\right)=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij}-\mu_{kj}\right)^2} \qquad (3)$$

โดยที่:

x_i คือ เวกเตอร์ของจุดข้อมูลลำดับที่ i

μ_k คือ เวกเตอร์ของจุดศูนย์กลางของกลุ่มที่ k

x_{ij} และ μ_{kj} คือ ค่าคุณลักษณะลำดับที่ j ของ x_{ij} และ μ_{kj} ตามลำดับ

n คือ จำนวนคุณลักษณะ (Features) ของข้อมูล

(4) หลังจากจัดกลุ่มข้อมูลแล้ว จะคำนวณจุดศูนย์กลางใหม่ของแต่ละกลุ่มโดยใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มนั้น โดยสมการของจุดศูนย์กลางใหม่ดังสมการที่ (4)

$$\mu_k=\frac{1}{\left|C_k\right|}\sum_{x_i\in C_k}x_i \qquad (4)$$

โดยที่:

x_i คือ เวกเตอร์ของจุดข้อมูลลำดับที่ i

μ_k คือ จุดศูนย์กลางใหม่ของกลุ่มที่ k

C_k คือ เซตของข้อมูลที่อยู่ในกลุ่ม k

$\left|C_k\right|$ คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่ม k

(5) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มจะไม่เปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งถือว่าอัลกอริทึมเข้าสู่ภาวะสมดุล (Stable State) ขั้นตอนนี้ใช้พารามิเตอร์ max_iter ที่กำหนดไว้ในคลาส KMeans เพื่อใช้ควบคุมจำนวนรอบสูงสุดของการทำงาน โดยกำหนดพารามิเตอร์ max_iter=300 เพื่อควบคุมจำนวนรอบสูงสุดของการปรับ centroid เป็นค่าพื้นฐานที่แนะนำในเอกสารทางเทคนิคของไลบรารีของ scikit-learn

4.2 HC เป็นการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้นโดยการรวมกลุ่มที่ใกล้เคียงกันที่สุดไปเรื่อย จากนั้นกำหนดวิธีการเชื่อมโยงแบบ Ward (linkage='ward') เป็นวิธีที่ลดความแปรปรวนภายในกลุ่ม ช่วยให้กลุ่มที่ได้มีความแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น ในแต่ละขั้นตอนของการรวมกลุ่มจะเลือกการรวมกลุ่มที่ส่งผลให้ผลรวมของความแปรปรวนภายในกลุ่มเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (Hemad *et al*., 2022) โดยการคำนวณของวิธี Ward จะยึดหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) สามารถแสดงในรูปของฟังก์ชันการวัดระยะห่าง (Müllner, 2020) ได้ดังสมการที่ (5)

$$D_{(A,B)} = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} . \left\| \bar{x}_A - \bar{x}_B \right\|^2 \quad (5)$$

โดยที่

$D_{(A,B)}$ คือ ค่าระยะห่างระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B

n_A และ n_B คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่ม A และ B ตามลำดับ

$\bar{x}_A$ และ $\bar{x}_B$ คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในกลุ่ม A และ B ตามลำดับ

$\left\| \bar{x}_A - \bar{x}_B \right\|^2$ คือ ระยะห่างแบบ Euclidean Distance ยกกำลังสองระหว่างค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่ม

จากสมการจะเห็นได้ว่า วิธีการนี้จะเลือกจับคู่กลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยใกล้กันและมีจำนวนสมาชิกที่เหมาะสมเพื่อให้การรวมกลุ่มนั้นส่งผลต่อความแปรปรวนภายในกลุ่มน้อยที่สุด วิธีนี้เหมาะสำหรับข้อมูลเชิงปริมาณในกรณีที่ตัวแปรต้นมีลักษณะเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปเชิงตัวเลขก่อนเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณระยะห่างและการวิเคราะห์กลุ่มได้อย่างถูกต้อง (Murtagh & Legendre, 2014)

4.3 GMMs เป็นเทคนิคที่สามารถรองรับข้อมูลที่มีการกระจายตัวในลักษณะที่ไม่จำเป็นต้องมีขอบเขตแบบเชิงเส้น (non-linear boundaries) และสามารถจำแนกกลุ่มข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการ GMMs เป็นการจำลองการกระจายของข้อมูลโดยสมมุติว่าข้อมูลทั้งหมดเกิดจากการผสมกันของการแจกแจงแบบ Gaussian หลายตัว จำนวนกลุ่มเช่นเดียวกับทั้ง 2 วิธีข้างต้น จึงกำหนดให้ n_components = 3 ในคลาสของ GaussianMixture โดยแต่ละกลุ่ม k จะมีการแจกแจงปกติของตัวเอง (Huang *et al*., 2023) ดังนั้นฟังก์ชันความหนาแน่นร่วมของ GMMs สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$p(x) = \sum_{k=1}^{K} \pi_k . N\left(x \middle| \mu_k, \sum k\right) \quad (6)$$

โดยที่

x คือ เวกเตอร์ของข้อมูล (เช่น อายุ การดื่มแอลกอฮอล์ การใช้สารเสพติด ความก้าวร้าว ฯลฯ)

K คือ จำนวนกลุ่ม (clusters) ที่ต้องการจำแนก เช่น กลุ่มความเสี่ยงต่ำ ปานกลาง และสูง

π_k คือ น้ำหนักของกลุ่มที่ k (mixing coefficient) $\left(\sum_{k=1}^{K} \pi_k = 1, 0 < \pi_k < 1\right)$

μ_k คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ k

$\sum_k$ คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (covariance matrix) ของกลุ่มที่ k

โดยการแจกแจงแบบ Gaussian ในแต่ละกลุ่มสามารถนิยามได้ดังสมการ (7)

$$N\left(x|\mu_k\right) = \frac{1}{\left(2\pi^{d/2}\left|\sum_k\right|^{1/2}\right)} \exp\left(-\frac{1}{2}(x-\mu_k)^T \sum_k^{-1}(x-\mu_k)\right) \quad (7)$$

โดยที่

x คือ เวกเตอร์ข้อมูลที่ต้องการคำนวณค่าความน่าจะเป็น ซึ่งในบริบทของการวิจัยอาจประกอบด้วยตัวแปร เช่น อายุ การดื่มแอลกอฮอล์ การใช้สารเสพติด ความก้าวร้าว ฯลฯ

μ_k คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่ k

$\sum_k$ คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (covariance matrix) ของกลุ่มที่ k

$\left|\sum_k\right|$ คือ Determinant ของเมทริกซ์ $\sum_k$ ซึ่งใช้เป็นตัวปรับขนาดความน่าจะเป็นในหลายมิติ

$\sum_k^{-1}$ คือ เมทริกซ์ผกผันของ $\sum_k$ ใช้ในการคำนวณระยะห่างแบบ Mahalanobis (AntixK, 2024)

d คือ จำนวนมิติของข้อมูลหรือตัวแปรต้น

exp คือ ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล

ประเภทของ covariance_type ใน GMMs งานวิจัยนี้เลือกใช้ covariance_type='full' ซึ่งช่วยให้การแจกแจงสามารถสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นได้อย่างสมบูรณ์ในบริบทของการจำแนกกลุ่มความเสี่ยง เช่น ความเสี่ยงต่ำ ปานกลาง และสูง จากข้อมูลสุขภาพจิตและพฤติกรรม ช่วยให้โมเดลสามารถแยกกลุ่มที่มีความซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถอธิบายโครงสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ครบถ้วน (Budiarto *et al*., 2021)

5. ประเมินสิทธิภาพของโมเดล (Model Evaluation)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและการตีความผลลัพธ์ของโมเดลการจัดกลุ่มแต่ละแบบ มีวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบเดียวกันคือ คำนวณค่าเฉลี่ยของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละกลุ่ม เช่น อายุ การดื่มแอลกอฮอล์ การใช้สารเสพติด ฯลฯ และวิเคราะห์ความคล้ายคลึงกันและความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ตรวจสอบว่าแต่ละกลุ่มมีลักษณะเฉพาะอย่างไร และมีปัจจัยเสี่ยงใดที่เด่นชัดในแต่ละกลุ่ม ผู้วิจัยมีวิธีการประเมินดังนี้

5.1 Silhouette Score เป็นวิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมที่สุดที่กล่าวไว้ก่อนหน้าคือการหาค่าเฉลี่ย Silhouette

5.2 Calinski-Harabasz Index เป็นตัวชี้วัดการจัดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ประเมินความแข็งแกร่งของการจัดกลุ่มโดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่มกับความแปรปรวนของข้อมูลต่างกลุ่ม ดังสมการ

ที่ (8) โดยใช้พารามิเตอร์ calinski_harabasz_score ค่าสูงหมายถึงการจัดกลุ่มที่ดี โดยความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่มมีค่าน้อยและความแปรปรวนของข้อมูลต่างกลุ่มมีค่ามาก (Lima & Cruz, 2020)

$$CH = \frac{SSB / (k-1)}{SSW / (N-k)} \quad (8)$$

โดยที่

SSB คือ ผลรวมของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม

SSW คือ ผลรวมของความแปรปรวนภายในกลุ่ม

k คือ จำนวนกลุ่ม

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

5.3 Davies-Bouldin Index เป็นตัวชี้วัดการจัดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ประเมินความคล้ายคลึงระหว่างกลุ่มข้อมูล โดยคำนวณจากอัตราส่วนของความคล้ายคลึงกันภายในกลุ่มกับความคล้ายคลึงกันระหว่างกลุ่ม ค่าต่ำหมายถึงการจัดกลุ่มที่ดี โดยข้อมูลภายในกลุ่มมีความคล้ายคลึงกันมากและข้อมูลต่างกลุ่มมีความแตกต่างกันมาก (Hassan *et al*., 2021) โดยใช้พารามิเตอร์ davies_bouldin_score ดังสมการที่ (9)

$$DBI = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} \max_{j \neq 1} \left(\frac{s_i + s_j}{M_{ij}} \right) \quad (9)$$

โดยที่:

k คือ จำนวนกลุ่มทั้งหมด

s_i คือ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแต่ละจุดข้อมูลในกลุ่มที่ i กับเซนทรอยด์ของกลุ่ม

M_{ij} คือ ระยะห่างระหว่างเซนทรอยด์ของกลุ่ม i และกลุ่ม j

6. การตีความผลและการจัดกลุ่มความเสี่ยง (Interpretation & Risk Grouping)

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการวิเคราะห์การจัดกลุ่มข้อมูล ผู้วิจัยได้ดำเนินการตีความผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเพื่อนำไปสู่การจัดกลุ่มบุคคลตามระดับความเสี่ยงต่อปัญหาความรุนแรงในครอบครัวและสุขภาพจิต

เริ่มจากการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงประชากรและพฤติกรรมของสมาชิกในแต่ละกลุ่มที่ได้จากการจัดกลุ่มโดยใช้ข้อมูลเชิงสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ (เช่น อายุ การดื่มแอลกอฮอล์ การใช้สารเสพติด พฤติกรรมก้าวร้าว ปัญหาทางอารมณ์ และสุขภาพจิต) เพื่อสรุปลักษณะเฉพาะของแต่ละกลุ่ม ซึ่งช่วยให้สามารถจำแนกได้ว่าแต่ละกลุ่มมีระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ ปานกลาง หรือสูง

ผู้วิจัยได้แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ตามขั้นตอนก่อนหน้า ได้แก่ (1) กลุ่มเสี่ยงต่ำ (Cluster0: Low Risk) ซึ่งมีปัจจัยเสี่ยงในระดับต่ำหรือไม่มีเลย (2) กลุ่มเสี่ยงปานกลาง (Cluster1:Medium Risk) ซึ่งมีบางปัจจัยเสี่ยงร่วมกัน เช่น ความเครียดทางเศรษฐกิจหรือความก้าวร้าวระดับปานกลาง และ (3) กลุ่มเสี่ยงสูง (Cluster2:High Risk) ซึ่งมีหลายปัจจัยเสี่ยงร่วมกันอย่างชัดเจน เช่น การใช้สารเสพติดควบคู่กับปัญหาสุขภาพจิตและพฤติกรรมรุนแรง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์กลุ่มบุคคลในกลุ่มเสี่ยงต่ำที่มีพฤติกรรมผิดปกติ ที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงที่ซ่อนอยู่ กลุ่มนี้เรียกว่า กลุ่มเสี่ยงเงียบ (Silent Risk Group)

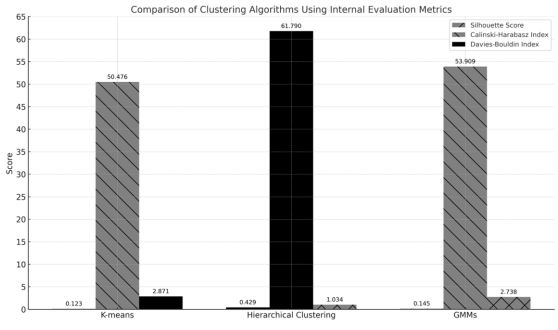


Figure 3 Comparison of Clustering Model

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จาก Table 2 แสดงการจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาสุขภาพจิตและปัญหาความรุนแรงในครอบครัว โดยใช้เทคนิคการจัดกลุ่มข้อมูล 3 เทคนิค พบว่าแต่ละเทคนิคสามารถแบ่งกลุ่มตามระดับความเสี่ยงได้ชัดเจน โดยมีลักษณะสำคัญดังนี้ (1) K-means แบ่งกลุ่มได้ใกล้เคียงกันในกลุ่ม Low และ Medium Risk โดยมีอายุเฉลี่ยประมาณ 36 ปี แต่ในกลุ่ม High Risk อายุสูงขึ้นเป็น 42 ปี โดยกลุ่ม High Risk มีจำนวนน้อยที่สุดและมีอัตราการหย่าร้างสูงถึง 1.0 (2) HC ให้ผลลัพธ์คล้ายกับ K-means แต่กลุ่ม Low Risk มีอายุเฉลี่ยต่ำที่สุด และกลุ่ม High Risk มีอัตราการหย่าร้างสูงเช่นกัน ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงในกลุ่มนี้อย่างชัดเจน และ (3) GMMs สามารถจำแนกปัจจัยความเสี่ยงได้ละเอียดกว่า โดยพบว่าในทุกกลุ่มความเสี่ยงมีปัจจัยด้านอารมณ์ และสุขภาพจิต เข้ามาเกี่ยวข้องชัดเจน เช่น กลุ่ม High Risk มีระดับความเสี่ยงด้านสุขภาพจิตสูงสุด และมีแนวโน้มปัญหาสุขภาพ และการพนันสูง โดยรวม GMMs แสดงความแตกต่างของกลุ่มได้เด่นชัดกว่าทั้ง K-means และ HC เพราะสามารถตรวจจับลักษณะเสี่ยงซ้อนกันหลายปัจจัยได้ดีกว่า เช่น ความก้าวร้าว ความหึงหวง และพฤติกรรมเสี่ยงอื่น ๆ พร้อมกันในแต่ละกลุ่ม แม้ว่าผลการจัดกลุ่มด้วยทั้ง 3 เทคนิคจะสามารถแบ่งกลุ่มผู้มี

ความเสี่ยงต่อความรุนแรงในครอบครัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อวิเคราะห์เชิงลึกลงไปด้วยเทคนิค Local Outlier Factor (LOF) พบว่ากลุ่มเสี่ยงต่ำมี บุคคลบางรายที่มีลักษณะผิดปกติ (outliers) ซึ่งสะท้อนความเสี่ยงที่ซ่อนอยู่ บุคคลทั้งหมดในกลุ่ม outlier ที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงต่ำ มีประวัติการใช้สารเสพติด แม้จะไม่มีปัจจัยเสี่ยงอื่นที่มักปรากฏร่วม เช่น ปัญหาสุขภาพจิต ความเครียดทางเศรษฐกิจ หรือประวัติการหย่าร้าง นอกจากนี้ยังพบพฤติกรรมบางรายที่เกี่ยวข้องกับการใช้อำนาจในครอบครัว และภาวะอารมณ์โกรธรุนแรง แม้ไม่มีปัญหาทางจิตเวชอย่างชัดเจน ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การประเมินความเสี่ยงโดยอิงเฉพาะค่ากลางหรือปัจจัยพื้นฐานที่ปรากฏเด่นชัดอาจไม่สามารถตรวจจับกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมที่ซ่อนอยู่ได้อย่างเพียงพอ โดยเฉพาะผู้ที่ไม่มีปัจจัยเสี่ยงตามแบบแผน เช่น สุขภาพจิตหรือสถานะเศรษฐกิจ แต่กลับมีพฤติกรรมเสี่ยงที่เป็นอิสระ เช่น การเสพยา หรือการใช้อารมณ์รุนแรง

ข้อค้นพบนี้จึงชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบคัดกรองที่สามารถตรวจจับ “กลุ่มเสี่ยงเงียบ” ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรใช้แนวทางการผสมผสานระหว่างเทคนิคการจัดกลุ่ม และเทคนิคการตรวจจับความผิดปกติ (Anomaly detection) เพื่อสนับสนุนการวางแผนแทรกแซงเชิงป้องกันที่ครอบคลุมกลุ่มเสี่ยงที่ตรวจจับยากได้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะสำหรับข้อมูลที่มีลักษณะซับซ้อนและมีพฤติกรรมแฝงที่หลากหลาย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จาก Figure 3 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิค พบว่า HC ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด บ่งชี้ถึงการจัดกลุ่มที่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้ชัดเจนกว่าวิธีอื่น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al*. (2025) และ Amer *et al*. (2024) สาเหตุที่ HC ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ได้แก่ (1) สามารถสะท้อนโครงสร้างข้อมูลได้ดีกว่า โดยเฉพาะในข้อมูลที่มีแนวโน้มเป็นลำดับชั้น (2) จัดการกับข้อมูลที่ไม่สมดุลได้ดีกว่า K-means และ GMMs (3) ไม่ต้องกำหนดจำนวนกลุ่มล่วงหน้า ทำให้เหมาะกับข้อมูลที่มีการกระจายตัวที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของ HC คือใช้ทรัพยากรคำนวณสูงและอ่อนไหวต่อค่าผิดปกติดังนั้นการใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น การลดขนาดข้อมูลหรือการกำจัดค่าผิดปกติล่วงหน้าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดกลุ่ม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 2 โมเดลที่เหลือ พบว่า GMMs ให้ค่า Silhouette Score สูงกว่า แสดงถึงความสามารถในการสร้างกลุ่มที่มีความเหมือนกันของข้อมูลภายในกลุ่มและมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้ดีกว่า นอกจากนี้ GMMs ยังมีค่า Calinski-Harabasz Index สูงกว่า บ่งชี้ว่ากลุ่มที่ได้จาก GMMs มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่ชัดเจนและภายในกลุ่มมีความสอดคล้องกันมากกว่า K-mean สำหรับค่า Davies-Bouldin Index ค่าที่ต่ำกว่าจะสะท้อนถึงการจัดกลุ่มที่มีคุณภาพ พบว่า GMMs มีค่าต่ำกว่า K-means แสดงว่า GMMs สามารถสร้างกลุ่มที่มีข้อมูลในกลุ่มที่เหมือนกันดี และข้อมูลต่างกลุ่มแยกออกจากกันชัดเจน กล่าวคือ GMMs สามารถจำแนกกลุ่มบุคคลเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้สมาชิกที่มีพฤติกรรมเสี่ยงสูงอยู่รวมกัน ได้แก่ พฤติกรรมการดื่มแอลกอฮอล์ในระดับสูง, ความก้าวร้าวสูง และปัญหาสุขภาพกายในระดับสูงสุด ซึ่งแสดงถึงความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นร่วมกันอย่างชัดเจน แม้ข้อมูลบางส่วนมีความแปรปรวนเล็กน้อยระหว่างบุคคล ตัวอย่างเช่น บุคคลที่มีพฤติกรรมเสี่ยงเพียงบางด้านแต่มีคะแนนความก้าวร้าวหรือสุขภาพกายสูงก็ยังสามารถถูกรวมอยู่ในกลุ่มเสี่ยงสูงได้อย่างเหมาะสม ด้วยความสามารถของ GMMs ในการใช้แนวทางการจัดกลุ่มแบบความน่าจะเป็น ซึ่งข้อมูลแต่ละตัวมีความน่าจะเป็นเกิดขึ้นได้ในหลายกลุ่ม (Soft assignment) ต่างจาก K-mean ที่ใช้แนวทางการจัดกลุ่มแบบจัดกลุ่มแบบเด็ดขาด ข้อมูลแต่ละตัวอยู่ในกลุ่มเดียวแน่นอน (Hard Assignment)

Table 2 Comparative Characteristics of Risk Groups Identified by Clustering Techniques

Model	Risk	Age	Alcohol	Drugs	Aggression	Jealousy	Mental	Divorce	Health	Gambling	Stress	N
K-means	Low (Cluster0)	36.13	0.33	0.5	0.88	-	-	0.96	0.94	-	-	214
	Medium (Cluster1)	36.55	0.88	0.7	0.61	-	-	0.97	0.98	-	-	370
	High (Cluster2)	42.54	0.77	0.38	0.77	-	-	0.92	1.0	-	-	13
HC	Low (Cluster0)	30.53	0.63	0.53	0.47	-	-	0.95	0.0	-	-	19
	Medium (Cluster1)	36.59	0.68	0.63	0.72	-	-	0.97	1.0	-	-	565
	High (Cluster2)	42.54	0.77	0.38	0.77	-	-	0.92	1.0	-	-	13
GMMs	Low (Cluster0)	29.3	0.65	0.65	0.74	1.0	0.75	1.0	0.95	1.0	0.98	285
	Medium (Cluster1)	33.29	0.8	0.75	0.74	1.0	0.92	0.94	1.0	0.95	0.66	189
	High (Cluster2)	37.52	0.61	0.53	0.68	0.0	0.93	1.0	0.96	0.98	0.92	123

ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Liu *et al*. (2021) ที่เน้นถึงความสำคัญของการใช้ตัวชี้วัดภายในในการประเมินคุณภาพของการจัดกลุ่ม โดยเฉพาะ Silhouette Score, Calinski-Harabasz Index, และ Davies-Bouldin Index ซึ่งสามารถสะท้อนความสอดคล้องภายในกลุ่มและความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้อย่างชัดเจน การจัดกลุ่มสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละกลุ่มความเสี่ยง เช่น กลุ่มเสี่ยงสูงมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยเชิงประชากรศาสตร์บางประการ ได้แก่ เพศชาย อายุช่วงกลางคน การมีภาวะสุขภาพจิต หรือประวัติการใช้สารเสพติด กลุ่มเสี่ยงสูงมีลักษณะดังนี้คือ ส่วนใหญ่เป็น เพศชายและมีอายุอยู่ในช่วง 35-50 ปี มีประวัติการใช้สารเสพติดและแอลกอฮอล์สูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ แสดงพฤติกรรมก้าวร้าวและมีระดับความเครียดทางเศรษฐกิจสูง สำหรับปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความรุนแรงในครอบครัวคือ มีปัญหาสุขภาพจิต เช่น ภาวะซึมเศร้าและความโกรธที่รุนแรง ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมรุนแรงในครอบครัว ส่วนใหญ่คือการใช้สารเสพติด เพิ่มโอกาสเกิดความรุนแรงสูงถึง 65% ความเครียดทางเศรษฐกิจเป็นบุคคลที่มีปัญหาทางการเงินมีแนวโน้มเกิดความรุนแรงสูงขึ้น 30% และสุดท้ายปัญหาสุขภาพจิต ผู้ที่มีภาวะซึมเศร้าหรือความโกรธสูงมีแนวโน้มก่อความรุนแรงมากกว่ากลุ่มทั่วไป 45% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jewkes *et al*. (2015) ที่ระบุว่าความเสี่ยงต่อพฤติกรรมรุนแรงในครอบครัวมักสัมพันธ์กับปัจจัยหลายมิติ ทั้งด้านเศรษฐกิจและจิตสังคม ดัง Figure 4 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Lima and Cruz (2020) ที่ใช้เพียงเทคนิค HC ในการจำแนกกลุ่มความเสี่ยงของผู้ป่วย พบว่า งานวิจัยฉบับนี้ซึ่งใช้การเปรียบเทียบหลากหลายเทคนิคการจัดกลุ่มทั้ง K-means, HC และ GMMs ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ อีกทั้งยังเปิดโอกาสให้นักวิจัยสามารถเลือกใช้โมเดลที่เหมาะสมกับบริบทของข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบหลายโมเดลร่วมกัน

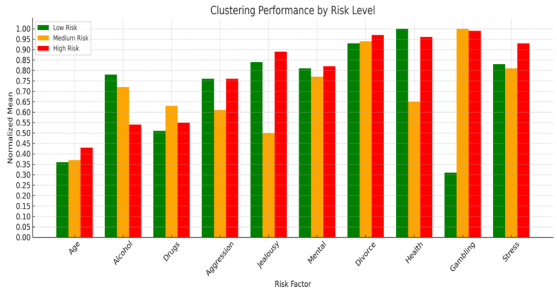


Figure 4 Clustering Performance by Risk Level

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ได้แก่ ความไม่สมดุลของข้อมูล (Imbalanced Data) จำนวนข้อมูลในแต่ละกลุ่มอาจมีความแตกต่างกันมาก เช่นปัญหาสุขภาพจิต (16.02%) และการติดการพนัน (2.24%) เป็นต้น เนื่องจากโมเดลมีแนวโน้มเรียนรู้จากกลุ่มข้อมูลที่มี

จำนวนมากและอาจมองข้ามกลุ่มข้อมูลที่มีจำนวนน้อย ผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้โมเดลไม่สามารถแยกแยะหรือตรวจจับกลุ่มเสี่ยงที่แท้จริงได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะในกลุ่มที่มีปัญหาเฉพาะ เช่น กลุ่มที่มีปัญหาสุขภาพจิตหรือการติดการพนัน แม้ว่าจะเป็นปัจจัยที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมความรุนแรงในครอบครัว ก็ตาม สำหรับแนวทางในการแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ในการจำแนก อาจใช้เทคนิค SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) เพื่อเพิ่มตัวอย่างของกลุ่มที่มีจำนวนน้อยโดยการสร้างตัวอย่างเทียม (Synthetic Sample) เพิ่มเข้าไปในกลุ่มย่อยเหล่านั้น ช่วยให้โมเดลมีโอกาสเรียนรู้จากกลุ่มข้อมูลจำนวนน้อยได้มากขึ้นโดยไม่สูญเสียข้อมูลจากกลุ่มอื่น หรือปรับค่าการให้น้ำหนักกับจุดข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มจำนวนน้อย เช่น บุคคลที่มีปัญหาสุขภาพจิต อาจกำหนดน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพื่อส่งผลต่อการคำนวณ Centroid หรือการกระจายของกลุ่ม ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ตัวอย่างบางตัวมีอิทธิพลมากกว่าตัวอื่นในการกำหนดตำแหน่ง centroid เป็นต้น สำหรับ K-means ใช้วิธี Weighted Centroid เพื่อคำนวณค่าของ Centroid ช่วยให้ได้ Centroid ที่สะท้อนกลุ่มเสียงข้างน้อยมากขึ้น และ GMMs ใช้ Weighted EM เพื่อช่วยให้โมเดลระบุตำแหน่งของกลุ่มได้ใกล้ความจริงมากขึ้น และค่าการกระจายของกลุ่มที่สามารถสะท้อนลักษณะของกลุ่มนั้นได้ชัดขึ้น

การศึกษาวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยมีแนวโน้มที่จะขยายผลการศึกษาโดยการเปรียบเทียบโมเดลทั้งสามในด้านอื่นเช่น ความเร็วในการประมวลผล และการใช้ทรัพยากรระบบ เพื่อสะท้อนศักยภาพของแต่ละโมเดลได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้งานในสถานการณ์ที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อสำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล (องค์การมหาชน) (สพร.) ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับผู้กระทำความรุนแรงในครอบครัว เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์และจัดกลุ่มเพื่อจำแนกกลุ่มบุคคลที่มีความเสี่ยงสูงต่อปัญหาความรุนแรงในครอบครัว ผู้วิจัยขอขอบคุณวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้เกียรติรับพิจารณาและตีพิมพ์ผลงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งเป็นโอกาสสำคัญในการเผยแพร่ความรู้และแนวทางการศึกษาที่อาจเป็นประโยชน์ต่อการแก้ไขปัญหาความรุนแรงในครอบครัวในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

ณัฐวุฒิ แถมเงิน, ปกรณ์ ล่องทอง, พงศศรัณย์ ทองหนูนุ้ย, กนกวรรณ ละอองศรี, อนามัย เทศกะทึก, พีรพล ศิริพงศ์วุฒิกร, และณฐนนท์ เทพตะขบ, และวิริยะ มหิกุล. (2567). การเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายระดับความรุนแรงของความผิดปกติของความยืดหยุ่นปอดของพนักงานโรงงาน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, *43*(2), 84–95.

พิทยา สังข์แก้ว, รุ่งทิวา เสาวนีย์, และอารยา หาอุปละ. (2565). การสำรวจความรุนแรงในครอบครัวในสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 กรุงเทพฯ. *Rama Medical Journal*, *45*(3), 33–41. https://doi.org/10.33165/rmj.2022.45.3.257258

สำนักงานพัฒนารัฐบาลดิจิทัล. (2567). *ข้อมูลผู้กระทำความรุนแรงในครอบครัว* [ชุดข้อมูล]. ศูนย์กลางข้อมูลเปิดภาครัฐ. https://gdcatalog.go.th/dataset/gdpublish-dwf-pb-dmv01-050507-04 (เข้าถึงเมื่อ 3 มีนาคม2568)

อรรคพล ดำเนินผล. (2564). *บทบาทศูนย์พัฒนาครอบครัวในชุมชนกับปัญหาความรุนแรงในครอบครัว: กรณีศึกษาศูนย์พัฒนาครอบครัวในชุมชน ตำบลท่าทราย จังหวัดนนทบุรี* (สารนิพนธ์ปริญญารัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, Chula Digital Collections. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/8052

Amer, A. A., Al-Razgan, M., Abdalla, H. I., Al-Asaly, M., Alfakih, T., & Al-Hammadi, M. (2024). Neighboring-aware hierarchical clustering: A new algorithm and extensive evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, *20*(1). https://doi.org/10.4018/ IJSWIS.346377

Analytics Vidhya. (2021, January 12). *In-depth intuition of K-means clustering algorithm in machine learning*. https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/01/in-depth-intuition-of-k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning/

AntixK. (2024, January 12). *Extending Mahalanobis distance to Gaussian mixtures*. https://antixk.netlify.app/blog/gmm_mahalanobis/

Arora, N., Singh, A., Al-Dabagh, M. Z. N., & Maitra, S. K. (2022). A novel architecture for diabetes patients' prediction using K-means clustering and SVM. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 4815521. https://doi.org/10.1155/2022/4815521

Budiarto, A., Mahesworo, B., Hidayat, A. A., Nurlaila, I., & Pardamean, B. (2021). Gaussian mixture model (GMMs) implementation for population stratification estimation from genomics data. *Procedia Computer Science*, *179*, 202–210. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.12.026

BuiltIn. (2024). *The elbow method for clustering explained*. https://builtin.com/data-science/elbow-method

GeeksforGeeks. (2020, May 8). *Elbow method for optimal value of k in KMeans*. https://www.geeksforgeeks.org/elbow-method-for-optimal-value-of-k-in-kmeans/

Georgiou, K. (2024). Thematic analysis: A practical guide. *European Journal of Psychotherapy & Counselling*. https://doi.org/10.1080/13642537.2024.2391666

Hasan, M. K., Alam, M. A., Das, D., Hossain, E., & Hasan, M. (2020). Diabetes prediction using ensembling of different machine learning classifiers. *IEEE Access*, *8*, 76516–76531. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989857

Hassan, B. A., Rashid, T. A., & Hamarashid, H. K. (2021). A novel cluster detection of COVID-19 patients and medical disease conditions using improved evolutionary clustering algorithm star. *Computers in Biology and Medicine*, *138*, Article 104866. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104866

Hemad, B. A., Ibrahim, N. M. A., Fayad, S. A., & Talaat, H. E. A. (2022). Hierarchical clustering-based framework for interconnected power system contingency analysis. *Energies*, *15*(15), Article 5631. https://doi.org/10.3390/en15155631

Huang, H., Liao, Z., Wei, X., & Zhou, Y. (2023). Combined Gaussian mixture model and pathfinder algorithm for data clustering. *Entropy*, *25*(6), Article 946. https://doi.org/10.3390/e25060946

Jewkes, R., Flood, M., & Lang, J. (2015). From work with men and boys to changes of social norms and reduction of inequities in gender relations: A conceptual shift in prevention of violence against women and girls. *The Lancet*, *385*(9977), 1580–1589. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)61683-4

Lima, S. P., & Cruz, M. D. (2020). A genetic algorithm using Calinski–Harabasz index for automatic clustering problem. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, *12*(3), 97–106. https://doi.org/10.5335/rbca.v12i3.11117

Liu, Y., Li, Z., Xiong, H., Gao, X., & Wu, J. (2021). Understanding of internal clustering validation measures. *Information Sciences*, *575*, 346–364. https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.07.021

Müllner, D. (2020). *Modern hierarchical, agglomerative clustering algorithms*. arXiv. https://arxiv.org/pdf/2005.03197

Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *Journal of Classification*, *31*(2), 274–295. https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z

Rizman Žalik, K., & Žalik, M. (2023). Comparison of K-means, K-means++, X-means and single value decomposition for image compression. In *27th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)* (pp. 295–301). IEEE. https://doi.org/10.1109/CSCC58962.2023.00055

Scikit-learn developers. (2023). *sklearn.metrics.silhouette_score*. https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.silhouette_score.html

Supakorn, S. (2021, December 14). *K-means clustering: การแบ่งกลุ่มย่อยเพื่อหาศูนย์กลาง!* Medium. https://medium.com/@si.supakorn_st/k-means-clustering-67a018f8cfb6

Wang, F., Franco-Penya, H.-H., Kelleher, J. D., Pugh, J., & Ross, R. (2017). An analysis of the application of simplified silhouette to the evaluation of k-means clustering validity. In P. Perner (Ed.), *Machine learning and data mining in pattern recognition. MLDM 2017. Lecture notes in computer science* (Vol. 10358, pp. 291–305). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62416-7_21

World Health Organization. (2024, March 25). *Violence against women*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/violence-against-women

Zhang, T., Ju, L., Singh, P., & Toor, S. (2025). *InfoHier: Hierarchical information extraction via encoding and embedding*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2501.08717

การสกัดคุณลักษณะด้วย CNN ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าเพื่อการระบุลักษณะทางสัณฐานของอะแคนทามีบาแบบอัตโนมัติ

Pre-trained CNN-based feature extraction for automatic morphological identification of *Acanthamoeba* spp.

ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ*, ธิติพร ประมวน[1], ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์ และพชร ตั้งตระกูลวงศ์[3]
Srisupang Thewsuwan[1], Thitiporn Pramoun[1], Theekapun Charoenpong[2] and Potchara Tangtragulwong[3]
Received: 28 February 2025 ; **Revised**: 19 June 2025 ; **Accepted**: 9 July 2025

บทคัดย่อ

อะแคนทามีบา (*Acanthamoeba* spp.) เป็นอะมีบาที่ดำรงชีวิตเป็นอิสระในสิ่งแวดล้อม และเป็นโพรโตซัวชนิดฉวยโอกาสที่มีศักยภาพในการส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ การระบุชนิดและสายพันธุ์ของอะแคนทามีบาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการวินิจฉัยและการรักษาโรค หนึ่งในวิธีการพื้นฐานของการจำแนกสายพันธุ์คือการประเมินขนาดและรูปร่างของผนังชั้นใน (endocyst) และ ผนังชั้นนอก (ectocyst) ของซีสต์ ซึ่งสามารถจำแนกกลุ่มตามคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาออกได้เป็น 3 กลุ่ม (GI, GII, GIII) อย่างไรก็ตาม กระบวนการระบุลักษณะทางสัณฐานนี้มักต้องใช้เวลาและความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบวิเคราะห์ภาพแบบอัตโนมัติสำหรับการจำแนกกลุ่มซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. โดยใช้เทคนิคการสกัดคุณลักษณะด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า (Pre-trained CNN) ร่วมกับตัวจำแนกประเภท Support Vector Machine (SVM) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวินิจฉัยทางพยาธิวิทยาและลดข้อผิดพลาดในการจำแนกกลุ่ม การสกัดคุณลักษณะนั้นดำเนินการโดยนำโมเดล CNN ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าจาก ImageNet (Xception, EfficientNet-B0, EfficientNet-B1, VGG16, ResNet50, ResNet101, MobileNet, Inception-V3 และ InceptionResNet-V2) มาสกัดคุณลักษณะ จากนั้นนำผ่านตัวจำแนก SVM เพื่อจำแนกกลุ่มซีสต์ (GI, GII, GIII) พร้อมกับมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการสกัดคุณลักษณะด้วยวิธีดั้งเดิม ผลการทดลองพบว่า ระบบที่ใช้ Pre-trained CNN ร่วมกับ SVM สามารถจำแนกซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยค่าความถูกต้องสูงกว่า 95% โดยที่ ResNet50 และ ResNet101 แสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถยืนยันถึงศักยภาพของการสกัดคุณลักษณะด้วย Pre-trained CNN เพื่อการจำแนกกลุ่มซีสต์ตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวินิจฉัยทางคลินิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อะแคนทามีบา, การระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา, CNN ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า, การสกัดคุณลักษณะ

Abstract

Acanthamoeba spp. are free-living protozoa and are known to cause severe infections in humans. Traditional morphological identification relies on assessing the size and shape of the inner (endocyst) and outer (ectocyst) walls of cysts, which are categorized into three groups (GI, GII, GIII). However, this method is time-consuming and requires skilled experts. This study aims to develop an automated image analysis system for the classification of *Acanthamoeba* spp. cysts by employing a pre-trained convolutional neural network (CNN)-based feature extraction approach combined with a Support Vector Machine (SVM) classifier to increase diagnostic accuracy in pathology and reduce classification

[1] ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก
[2] ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก
[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก
[1] Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok
[2] Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok
[3] Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok
* Corresponding author: Email: srisupang@g.swu.ac.th

errors. The feature extraction is performed using various CNN models pre-trained on ImageNet, including Xception, EfficientNet-B0, EfficientNet-B1, VGG16, ResNet50, ResNet101, MobileNet, Inception-V3, and InceptionResNet-V2, to extract high-level global features from microscope images of cysts. These extracted features are then input into an SVM for classifying the cysts into groups GI, GII, and GIII. Additionally, the performance of this approach is compared with that of conventional feature extraction methods. Experimental results demonstrated that the system employing pre-trained CNNs combined with SVM achieved an accuracy exceeding 95%, with ResNet50 and ResNet101 yielding the best results, respectively. These findings validate the potential of using pre-trained CNN-based feature extraction for the robust and efficient classification of complex morphological cyst groups, thereby offering a promising tool for enhancing clinical diagnostic procedures.

Keywords: *Acanthamoeba* spp., morphological identification, pre-trained CNN, feature extraction

บทนำ

Acanthamoeba spp. เป็นอะมีบาที่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติทั่วไป (Free-living amoebae: FLA) มักพบได้ทั้งสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติและสภาพแวดล้อมที่มนุษย์สร้างขึ้น อะมีบาเหล่านี้เป็นโพรโตซัวชนิดฉวยโอกาส และสาเหตุของการติดเชื้อในมนุษย์ที่รุนแรงเช่น โรคกระจกตาอักเสบ (Acanthamoeba Keratitis: AK) ภาวะเยื่อหุ้มสมองอักเสบชนิด Granulomatous Encephalitis (GAE) และโรคผิวหนังชนิดเฉียบพลัน (Acanthamoeba Skin Infection) (Possamai *et al*., 2018; Buppan *et al*., 2018) อะแคนทามีบาสามารถแบ่งวงจรการเจริญเติบโตออกเป็น 2 ระยะคือ ระยะโทรโฟซอยต์ (trophozoites) และระยะซีสต์ (cysts) โดยระยะโทรโฟซอยต์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12-35 ไมโครเมตร มีส่วนยื่นคล้ายขาเทียมที่มีลักษณะคล้ายหนาม (Acanthopodia) ส่วนระยะของซีสต์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-20 ไมโครเมตร มีผนังหุ้ม 2 ชั้น ได้แก่ ผนังชั้นนอก (ectocyst) และ ผนังชั้นใน (endocyst) ที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและสามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน สามารถจัดจำแนกกลุ่มของอะแคนทามีบาในระยะซีสต์ตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาออกได้เป็น 3 กลุ่มตามการจัดจำแนกของ Pussard and Pons (1977) ดังแสดงได้ดัง Figure 1 คือ ซีสต์กลุ่มที่ I (GI) จะมีขนาดใหญ่ ผนังชั้นนอกและชั้นในของซีสต์มีระยะใกล้กันมาก โดยผนังชั้นนอกจะมีผิวเรียบหรือหยักเป็นรอยหย่นเล็กน้อย ผนังชั้นในมีลักษณะเป็นแฉก คล้ายรูปร่างดาว ซีสต์กลุ่มที่ 2 (GII) จะมีผนังชั้นนอกและในอยู่ชิดหรือห่างกัน ผนังชั้นในจะมีรูปร่างหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม หลายเหลี่ยม แฉก กลม หรือรูปไข่ แต่มักจะเห็นแขนหรือแฉกไม่ชัดเจน และซีสต์กลุ่มที่ 3 (GIII) จะมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม ผนังชั้นนอกเรียบและบางหรือเป็นคลื่นเล็กน้อย โดยผนังชั้นในนั้นมักเห็นเป็นลักษณะกลมอาจจะเห็นเป็นมุม 3-5 มุม (จิตรกุล สุวรรณเจริญ และวัชรพงษ์ ศรีชุม, 2017)

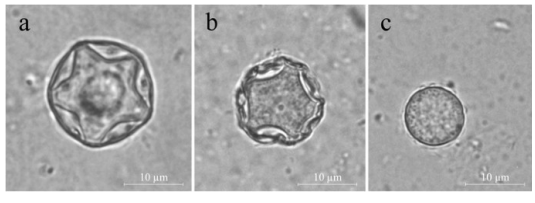


Figure 1 *Acanthamoeba* spp. categorizes the isolates into groups I, II, and III, according to the shape of the inner (endocyst) and outer wall (ectocyst) and size of the cysts (Possamai et al., 2018)

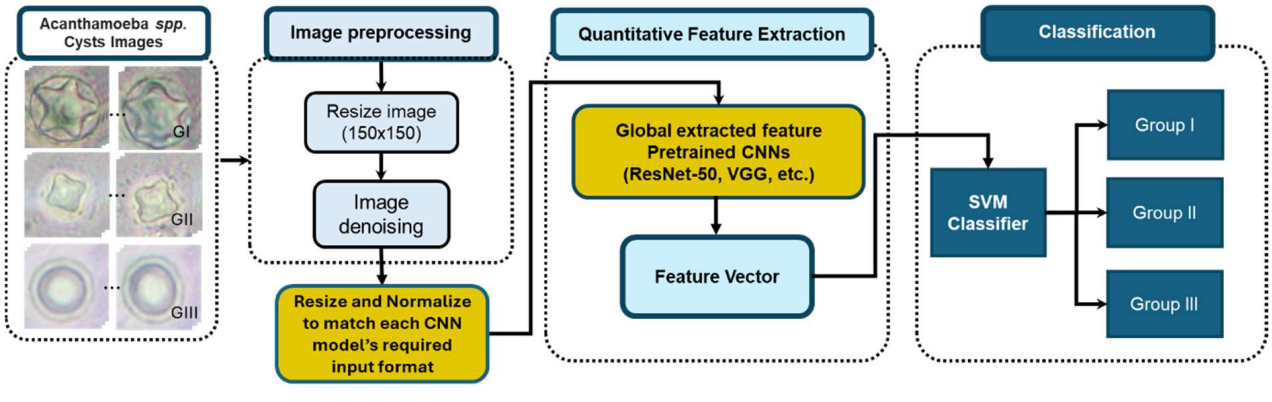


Figure 2 Overview of the proposed system

ระบบวิเคราะห์ภาพอัตโนมัติของกล้องจุลทรรศน์ในห้องปฏิบัติการทางคลินิก สามารถช่วยให้การประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยาของงานทางด้านพยาธิวิทยามีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น (Chen *et al*., 2012) การประเมินลักษณะสัณฐานวิทยาของ อะแคนทามีบาด้วยการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) สามารถประยุกต์ใช้ในการจำแนกลักษณะกลุ่มซีสต์ โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เชิงคุณภาพทางเซลล์วิทยาให้ เป็นค่าเชิงปริมาณ เช่น ความยาว พื้นที่ รูปร่าง และจำนวนเซลล์ กระบวนการจำแนกซีสต์นั้นจะอาศัยการสกัดตัวแทนที่มีลักษณะเฉพาะ (feature extraction) เชิงรูปร่างและคุณลักษณะเฉพาะเชิงพื้นผิวของซีสต์เพื่อกำหนดคุณสมบัติเชิงปริมาณที่สามารถระบุลักษณะของตัวแปรทางเซลล์วิทยา โดยมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ (i) การเก็บรวบรวมภาพและการประมวลผลเบื้องต้น (ii) การแบ่งส่วน (Chen *et al*., 2012) และ (iii) การสกัดข้อมูลเชิงปริมาณ (Barata *et al*., 2019)

การสกัดคุณลักษณะเฉพาะทางสัณฐานวิทยาร่วมกับกระบวนการการเรียนรู้ของเครื่อง ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการจำแนกกลุ่มซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. (ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ และภัทธกร บุบผัน, 2566) โครงสร้างของระบบดังกล่าวถูกออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวของซีสต์ โดยตัวแทนที่มีลักษณะเฉพาะนั้นจะถูกสกัดออกโดยใช้วิธี Histogram of Oriented Gradients (HOG) และ Local Binary Pattern (LBP) จากผลลัพธ์ทำให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคการวิเคราะห์ภาพขั้นสูงและการเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนก *Acanthamoeba* spp. อย่างไรก็ตามเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ ยังจำเป็นต้องปรับปรุงทั้งความแม่นยำ (precision) และค่าความไว (recall) ให้ดียิ่งขึ้น การปรับปรุงนี้มีความสำคัญเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในการลดค่าผลบวกปลอม (false positive) และผลลบปลอม (false negative) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การจำแนกซีสต์ระหว่างกลุ่ม GI กับกลุ่ม GII ยังคงเป็นเรื่องท้าทาย เนื่องจากรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอของกลุ่ม GII และความแปรปรวนภายในกลุ่มที่มีความแตกต่างกัน

Tajbakhsh *et al*. (2017) ได้ค้นพบว่าการสกัดตัวแทนที่มีลักษณะเฉพาะ ด้วยโครงข่ายคอนโวลูชันที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า (pre-trained CNNs) สามารถให้ผลลัพธ์ด้านการจำแนกที่ดี โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณข้อมูลอย่างจำกัด เนื่องจากน้ำหนักของโครงข่ายยังคงสามารถสะท้อนคุณลักษณะทั่วไปที่ได้จากชุดข้อมูลขนาดใหญ่ได้ เช่น Image Net อย่างไรก็ตามเทคนิค Fine-Tuning ซึ่งเป็นการปรับค่าน้ำหนักบางส่วนของโครงข่ายให้สอดคล้องกับลักษณะของปัญหาใหม่มักให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า เมื่อประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่และหลากหลาย จากแนวโน้มดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อการสกัดคุณลักษณะเฉพาะในกรณีที่ข้อมูลมีปริมาณจำกัด (Jogin *et al*., 2018; Puls *et al*., 2023) ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการจำแนกประเภทของภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการสกัดคุณลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคทำมือ (Hand-Crafted Feature Extraction) อีกทั้งการใช้โครข่ายประสาทแบบคอนโวลูชันยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรักษาเอกลักษณ์ของข้อมูล (preserve similarity) (Atasoy & Kutlu, 2025) แม้ว่าจะมีการแปลงข้อมูลจากปริภูมิต้นฉบับ (input space) ไปยังปริภูมิตัวแทนที่มีมิติสูง (high-dimensional feature space) ก็ตาม

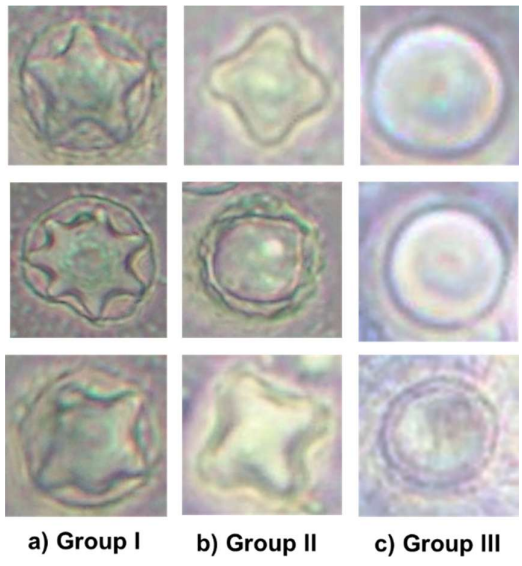


Figure 3 Example images of the *Acanthamoeba* spp. dataset which divides into three groups: a) cyst's morphology as group I, b) group II and c) group III

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบวิเคราะห์ภาพสำหรับการจำแนกซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. ด้วยโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าในการหาคุณลักษณะเด่นภาพรวม (Global features) เพื่อตรวจจับความแปรปรวนทางรูปทรงที่ซับซ้อนของ *Acanthamoeba* spp. จากนั้นใช้กระบวนการการเรียนรู้ของเครื่องเข้ามาทำการคัดแยกกลุ่มของซีสต์ออกเป็นทั้งหมด 3 กลุ่ม ด้วยระบบอัตโนมัติตามหลักเกณฑ์ของ Pussard and Pons (1977) ผลการศึกษาพบว่า งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบที่ส่งเสริมการทำงานของผู้เชี่ยวชาญในห้องปฏิบัติการทางคลินิกต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

การพัฒนาระบบวิเคราะห์ภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกซีสต์ (cyst) ของ *Acanthamoeba* spp. ด้วยเทคนิคการสกัดคุณลักษณะด้วยสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน Convolutional Neural Networks (CNNs) ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวกเตอร์คุณลักษณะจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า

วิธีการดำเนินงาน

จาก Figure 2 ภาพรวมของระบบงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1. ข้อมูลภาพซีสต์ *Acanthamoeba* spp. และการประมวลผลภาพเบื้องต้น, 2. การสกัดคุณลักษณะเด่นด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน และ 3. การจำแนกกลุ่มของซีสต์ *Acanthamoeba* spp

1. ชุดข้อมูลภาพซีสต์ *Acanthamoeba* spp. และการประมวลผลภาพเบื้องต้น

ชุดข้อมูลภาพซีสต์ของอะแคนทามีบา (Buppan *et al*., 2018) ถูกบันทึกจากกล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 400 เท่า โดยผู้วิจัยได้ระบุตำแหน่งของซีสต์ในแต่ละภาพ และจัดกลุ่มตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ GI, GII และ GIII รวมจำนวนทั้งสิ้น 1,800 ภาพ ดังตัวอย่างใน Figure 3 สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลการฝึกสอน (training set) ประกอบด้วย 80% ของภาพทั้งหมด (1,200 ภาพ) โดยการฝึกสอนใช้การตรวจสอบความสมเหตุสมผลแบบไขว้ 10 ส่วนทบ (10-fold cross-validation) และข้อมูลการทดสอบภายนอก (external testing set) ประกอบด้วย 20% ของภาพทั้งหมด (600 ภาพ) การแบ่งข้อมูลใช้วิธีการสุ่มโดยควบคุมไม่ให้ภาพจากกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งมีอคติหรือความไม่สมดุลระหว่างกลุ่มภายในชุดข้อมูลฝึกและทดสอบ

กระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น เป็นการเตรียมภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโมเดล CNN และสกัดคุณลักษณะเด่นของภาพ ซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ (i) การปรับขนาดของภาพเบื้องต้นให้เป็น 150×150 พิกเซล เพื่อจัดมาตรฐานให้กับข้อมูลภาพที่มีขนาดแตกต่างกันในเบื้องต้น ก่อนที่จะมีการปรับขนาดอีกครั้งให้เหมาะสมกับข้อกำหนดของอินพุตในแต่ละโมเดล CNN ที่ใช้งาน ตามที่แสดงรายละเอียดใน Table 1 และ (ii) การลดสิ่งเจือปนบนภาพ โดยใช้วิธีการกรองภาพโดยการใส่ตัวกรองสัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian filter) ขนาด 55 เพื่อเพิ่มความชัดเจนของขอบซีสต์และลดสัญญาณรบกวน

2. การสกัดคุณลักษณะเด่นด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (ConvNet as fixed feature extractor)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNNs/ConvNet) ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าบนชุดข้อมูล ImageNet (Deng *et al*., 2009) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสกัดคุณลักษณะเฉพาะภาพซีสต์อะแคนทามีบา โดยทำการสกัดคุณลักษณะจากชั้นเชื่อมโยงแบบสมบูรณ์ (fully connected layers) และชั้นการสกัดลักษณะเฉพาะ ตัวอย่างเช่น ชั้น FC6 หรือ FC7 ของสถาปัตยกรรม AlexNet (Deng *et al*., 2009) เป็นต้น ซึ่งผลลัพธ์จะถูกแสดงออกมาในรูปแบบของเวกเตอร์คุณลักษณะที่มีมิติสูง จากนั้นเวกเตอร์จะถูกนำไปใช้เป็นอินพุตให้กับตัวจำแนก Support Vector Machine (SVM) เพื่อทำหน้าที่ตัดสินใจว่า ภาพนั้นจัดอยู่ในประเภทหรือกลุ่มใด

งานวิจัยนี้มีการเลือกใช้สถาปัตยกรรมที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าบนชุดข้อมูล ImageNet ทั้งหมด 9 แบบ ได้แก่ Xception, EfficientNetB0, EfficientNetB1 VGG16, ResNet50, ResNet101, MobileNet, InceptionV3 และ InceptionResNetV2 โดยนำมาสกัดคุณลักษณะเฉพาะจากชั้น Global Average Pooling (GAP) Table 1 แสดงรายละเอียดความแตกต่างของขนาดเวกเตอร์คุณลักษณะที่สกัดได้ของแต่ละโมเดล ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เชิงสัณฐานวิทยา และสามารถอธิบายความแตกต่างของแต่ละสถาปัตยกรรมได้ดังนี้

Xception (Chollet, 2017) และ MobileNet (Howard *et al*., 2017; Sandler *et al*., 2018) เป็นสถาปัตยกรรมที่ออกแบบโดยใช้หลักการคอนโวลูชันแบบแยกตามความลึก (depthwise separable convolutions) ซึ่งช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์และเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบที่มี ข้อจำกัดด้านทรัพยากร ขณะที่ EfficientNet-B0 และ EfficientNet-B1 (Tan & Le, 2019) ใช้แนวคิด compound scaling ซึ่งพิจารณาร่วมกันทั้ง ความลึกของโครงข่าย ความกว้างของฟีเจอร์ และความละเอียดของภาพอินพุต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ ทั้งสองรุ่นจะใช้โครงสร้าง Inverted Bottleneck MBConv (Sandler *et al*., 2018) ที่ช่วยให้การสกัดคุณลักษณะเด่นมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

VGG (Simonyan & Zisserman, 2014) เป็นสถาปัตยกรรมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ด้วย

โครงสร้างที่เรียบง่ายแต่ลึก และการใช้ฟิลเตอร์ขนาด 3×3 อย่างต่อเนื่องในแต่ละชั้น Convolution จึงทำให้เอื้อต่อการจับลักษณะเชิงพื้นผิวและรายละเอียดที่ซับซ้อนในภาพ ในขณะที่ ResNet (He *et al*., 2016) จะใช้ Residual learning ด้วยการเชื่อมต่อแบบข้ามชั้น (skip connection) สำหรับการแก้ปัญหา vanishing gradient จึงทำให้สามารถฝึกฝนโมเดลที่มีความลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้กำหนดใช้โมเดล VGG16 ที่มีความลึก 16 ชั้น ResNet50 ที่มีความลึก 50 ชั้น และ ResNet101 ที่มีความลึก 101 ชั้น ของแต่ละการทดลอง

Table 1 Overview of selected CNN Architectures

Model	Input Size	Output Features	Depth
Xception	299 x 299	2048	71
EfficientNet-B0	224 x 224	1280	237
EfficientNet-B1	240 x 240	1280	240
VGG16	224 x 224	512	16
ResNet50	224 x 224	2048	50
ResNet101	224 x 224	2048	101
MobileNet	224 x 224	1024	28
Inception-V3	299 x 299	2048	48
Inception-ResNet-V2	299 x 299	1536	164

InceptionV3 (Szegedy *et al*., 2016) และ Inception ResNetV2 (Szegedy *et al*., 2017) เน้นการผสานแนวคิดจาก Multi-scale filter และการเชื่อมต่อแบบ residual (Residual Connections) ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อการฝึกฝนเครือข่ายที่มีความลึกมากขึ้น และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกภาพที่มีคุณลักษณะที่ซับซ้อน การใช้โมเดลเหล่านี้ช่วยให้สามารถสำรวจความแตกต่างของลักษณะสถาปัตยกรรมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของความแม่นยำในการจำแนกและการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอะแคนทามีบา

3. การจำแนกกลุ่มของซีสต์ *Acanthamoeba* spp.

การจำแนกกลุ่มซีสต์อะแคนทามีบาโดยใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาระบบวิเคราะห์อัตโนมัติ หลังจากสกัดคุณลักษณะที่โดดเด่นจากภาพออกมาแล้ว คุณลักษณะเหล่านี้จะถูกส่งผ่านตัวจำแนก (classifier) เพื่อทำนายประเภทกลุ่มของข้อมูล SVM (Furey *et al*., 2000) ถูกนำมาใช้สำหรับจำแนกกลุ่มซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. ตามเกณฑ์ของ Pussard and Pons (1977) ร่วมกับแนวทางการจำแนกแบบ One-vs-All (OVA) โดยตั้งค่า kernel เป็นแบบเชิงเส้น (linear) และเลือกใช้ค่า hyperparameter เริ่มต้นของแบบจำลอง เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพในเชิงเปรียบเทียบได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในบริบทของการเปรียบเทียบกระบวนการสกัดคุณลักษณะเด่นของแต่ละโมเดล

4. เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องและความแม่นยำของงานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดที่ด้านประสิทธิภาพที่ประกอบไปด้วยค่า Accuracy Precision, Recall และ F1-Score (Sokolova & Lapalme, 2009) โดยผ่านการวิเคราะห์ด้วย confusion matrix ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

Table 2 The median values of evaluation metrics for each pretrained CNN model on the *Acanthamoeba* spp. cyst classification task, obtained via repeated 10-fold cross-validation.

Model	Accuracy	F1		Precision		Recall	
		Mac.	Mic.	Mac.	Mic.	Mac.	Mic.
EfficientNetB0	0.965	0.965	0.965	0.967	0.965	0.965	0.965
EfficientNetB1	0.965	0.965	0.965	0.966	0.965	0.965	0.965
InceptionResNetV2	0.951	0.952	0.951	0.956	0.951	0.951	0.951
InceptionV3	0.965	0.965	0.965	0.966	0.965	0.965	0.965
MobileNet	0.965	0.965	0.965	0.968	0.965	0.965	0.965
ResNet101	**0.972**	**0.972**	**0.972**	**0.973**	**0.972**	**0.972**	**0.972**
ResNet50	**0.972**	**0.972**	**0.972**	**0.972**	**0.972**	**0.972**	**0.972**
VGG16	0.958	0.959	0.958	0.960	0.958	0.958	0.958
Xception	0.965	0.965	0.965	0.966	0.965	0.965	0.965

*Mac: Macro, ** Mic: Micro

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

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

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

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

โดย True Positive (TP) ผลลัพธ์จากการทำนายว่าซีสต์เป็นสมาชิกของกลุ่มที่ต้องการ และจริงแล้วซีสต์นั้นเป็นสมาชิกของกลุ่มนั้น True Negative (TN) ผลลัพธ์จากการทำนายว่าซีสต์ไม่เป็นสมาชิกของกลุ่มที่ต้องการ และจริงแล้วซีสต์นั้นไม่เป็นสมาชิกของกลุ่มนั้น False Positive (FP) ผลลัพธ์จากการทำนายว่าซีสต์เป็นสมาชิกของกลุ่มที่ต้องการ แต่จริงแล้วซีสต์นั้นไม่ใช่สมาชิกของกลุ่มนั้น และ False Negative (FN) ผลลัพธ์จากการ ทำนายว่าซีสต์ไม่เป็นสมาชิกของกลุ่มที่ต้องการ แต่จริงแล้วซีสต์นั้นเป็นสมาชิกของกลุ่มนั้น

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบคือ 1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Pretrained CNNs แต่ละสถาปัตยกรรม และ 2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Pretrained CNNs กับวิธีการดั้งเดิมอื่น ๆ

1. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Pretrained CNNs

การประเมินประสิทธิภาพของ CNNs ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้าเพื่อจำแนกซีสต์ของอะแคนทามีบา ได้ดำเนินการทดสอบและเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละโมเดล ด้วยวิธี Repeated Stratified 10-Fold Cross Validation โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ส่วน (10 folds) แบบแบ่งชั้น เพื่อรักษาสัดส่วนของข้อมูลในแต่ละกลุ่มและทำซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง (5 repeats) รวมเป็น 50 การวัดผลต่อหนึ่งโมเดล (10 folds × 5 repeats) ซึ่งจะช่วยลดอคติจากการสุ่มเพียงครั้งเดียว จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทดสอบทางสถิติด้วยการทดสอบ Friedman เพื่อประเมินความแตกต่างของโมเดลในภาพรวม โดยกำหนดค่าสำคัญทางสถิติ α เท่ากับ 0.05 (Rainio *et al*., 2024)

จากผลลัพธ์ใน Table 2 แสดงค่ามัธยฐาน (median) ของแต่ละตัวชี้วัด Accuracy, Precision, Recall, และ F1-score พบว่า ResNet50 และ ResNet101 ให้ผลการจำแนกที่ดีที่สุดในทุกตัวชี้วัด โดยมีค่า Accuracy, F1_macro และ F1_micro เท่ากับ 0.972 ในทางกลับกัน InceptionResNetV2 ให้ค่าตัวชี้วัดต่ำที่สุดทุกตัวชี้วัด โมเดลกลุ่ม EfficientNetB0, EfficientNetB1, InceptionV3, MobileNet และ Xception ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันในทุกตัวชี้วัด โดยมีค่า Accuracy, F1_macro และ F1_micro อยู่ที่ 0.965 และค่าอื่น ๆ อยู่ในช่วงเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงระดับประสิทธิภาพที่คล้ายคลึงกันระหว่างโมเดลเหล่านี้

1.1 การทดสอบทางสถิติด้วย Friedman

การทดสอบทางสถิติด้วย Friedman ถูกนำมาตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลแต่ละตัว จากการคำนวณอันดับเฉลี่ย (average ranking) ของแต่ละโมเดล ดัง Figure 4 โดยกำหนด

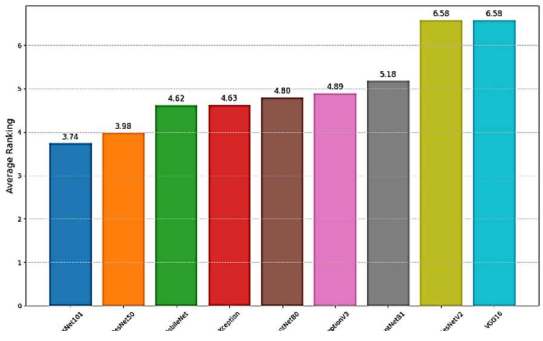


Figure 4 Average ranking of the Friedman test for comparative analysis of different models

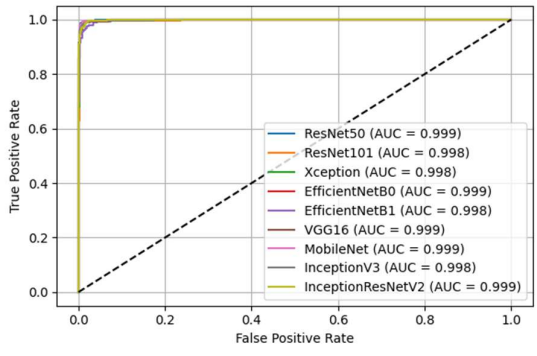


Figure 5 ROC curve for different models

สมมติฐานหลัก (H0) ระบุว่า โมเดลทั้งหมดมีพฤติกรรมหรือผลลัพธ์ที่เทียบเท่ากัน ในขณะที่สมมติฐานทางเลือก (H1) ระบุว่า จากโมเดลทั้งหมดมีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกันในผลลัพธ์ระหว่างโมเดล ซึ่งผลการทดสอบFriedman ให้ค่า p-value = 1.9667e-09 ที่ต่ำกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่ามีความแตกต่างของผลลัพธ์ระหว่างโมเดลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ResNet101 มีอันดับเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือ ResNet50 (3.74 และ 3.98 ตามลำดับ) สอดคล้องกับผลลัพธ์การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลทั้งสองที่มีค่า Accuracy, F1-score, Precision และ Recall สูงสุด (0.972) ในทุกตัวชี้วัด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการจำแนกข้อมูลได้อย่างแม่นยำและสม่ำเสมอ ในขณะที่ InceptionResNetV2 และ VGG16 มีอันดับเฉลี่ยต่ำที่สุด แม้จะมีค่า Accuracy และ F1-score ที่อยู่ในเกณฑ์ดี (0.951 และ 0.958 ตามลำดับ) แต่เมื่อเทียบกับโมเดลอื่นที่ให้ผลความแม่นยำสูงกว่าเล็กน้อย จึงทำให้ได้รับอันดับเฉลี่ยที่ลดลง

1.2 การวิเคราะห์ ROC Curve

จากผลการวิเคราะห์ ROC (Receiver Operating Characteristic) Curve เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลจำแนกกลุ่มเพิ่มเติม จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำนายผลบวกถูกต้อง (True Positive Rate) และอัตราการทำนายผลบวกผิด (False Positive Rate) โดยใช้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (AUC: Area Under the Curve) เป็นดัชนีเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของแต่ละโมเดล จาก Figure 5 แสดงค่า AUC จาก ROC Curve ของทุกโมเดลจะอยู่ในระดับที่สูงมากและใกล้เคียงกัน (0.998) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่ดีในภาพรวม แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับตัวชี้วัดอื่น เช่น Accuracy, F1 -score, Precision และ Recall พบว่าโมเดล ResNet101 และ ResNet50 แสดงผลลัพธ์ที่โดดเด่นได้อย่างต่อเนื่องในทุกตัวชี้วัด ทั้งในระดับ Macro และ Micro ขณะที่โมเดล EfficientNetB1(เส้นสีม่วง) แม้จะมีค่า AUC ใกล้เคียงกัน แต่ก็แสดงความผันผวนเล็กน้อยในบางตัวชี้วัด เช่น ค่า Precision และ F1-score

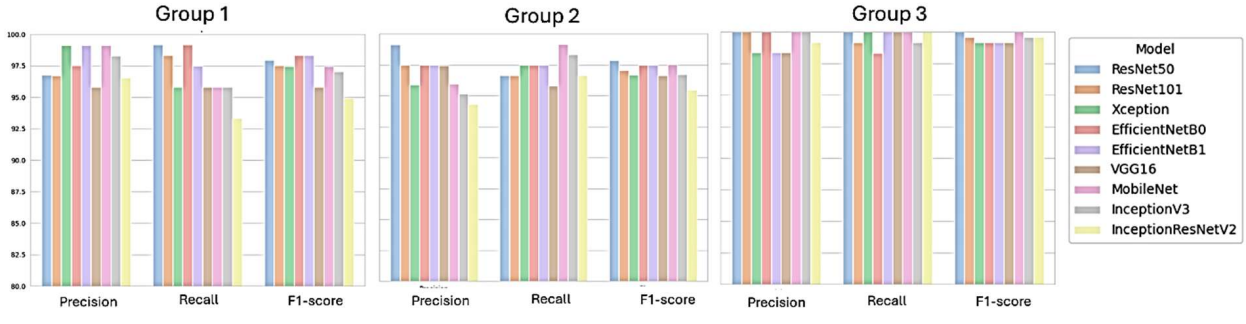


Figure 6 A comparison of the precision, recall and F1-score values of various pre-trained CNN models for classifying *Acanthamoeba* into three groups (GI, GII, and GIII).

Figure 6 แสดงผลลัพธ์การเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัด precision, recall และ F1-score ของแต่ละโมเดลในการจำแนกอะแคนทามีบาออกเป็น 3 กลุ่ม แต่ละกราฟย่อยแยกแสดงผลค่าตัวชี้วัดของแต่ละโมเดลอย่างชัดเจน ซึ่งโมเดลส่วนใหญ่ได้ผลลัพธ์ที่สูงในการจำแนกกลุ่มซีสต์ GIII ในขณะที่การจำแนกซีสต์ระหว่างกลุ่ม GI กับ GII เริ่มมีความแตกต่างกันระหว่างโมเดล เนื่องจากรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอของกลุ่ม GII และความแปรปรวนภายในกลุ่ม จากกราฟแสดงให้เห็นว่าโมเดล ResNet50, ResNet101 และ Xception สามารถรักษาระดับความแม่นยำได้ดีกว่าโมเดลอื่น ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพการสกัดคุณลักษณะและการจำแนกที่มีประสิทธิภาพ เช่น ResNet, Xception และ MobileNet อาจมีค่าสูงกว่าในบางกลุ่ม ในขณะที่โมเดลอย่าง VGG16 อาจมีค่าต่ำกว่าหรือมีความผันผวนมากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่า โมเดลที่มีโครงสร้างลึกและมีเทคนิคปรับปรุงการเรียนรู้ เช่น Residual Connections (ใน ResNet) หรือ โครงสร้าง Inverted Bottleneck MBConv (ในXception และ MobileNet) สามารถจับลักษณะทางสัณฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพความแม่นยำที่สูง

2. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดคุณลักษณะเด่นของ Pretrained CNNs

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวิธีการดึงลักษณะเด่นที่ได้นำเสนอ การทดลองนี้ได้เปรียบเทียบการสกัดคุณลักษณะเด่นด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันและวิธีการดั้งเดิม คือ Hu moment (Hu, 1962), HOG (Dalal & Triggs, 2005) วิธีการดึงลักษณะเด่นโดยการใช้ลักษณะเชิงพื้นผิววัตถุ ประกอบด้วย วิธีการ LBP และ LBPu2 (Ojala *et al*., 2002) วิธีการผสมผสานลักษณะเด่นเชิงรูปร่างและลักษณะพื้นผิวระหว่างวิธีการ HOG และ LBP (ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ และภัทธกร บุบผัน, 2566) Hu moment ถูกนำมาพิจารณาความเหมือนหรือต่างกันในลักษณะรูปร่างที่มีความทนทานต่อการเลื่อน (translation) เสกล (scale) และการหมุน (rotation) ของวัตถุในภาพ จากการทดลองจะได้ค่าขนาดเวกเตอร์เท่ากับ 7 ต่อภาพ วิธีการ HOG (Dalal & Triggs, 2005) ได้กำหนดเซลล์ของ HOG 1 บล็อก ไว้ที่ 6x6 เซลล์เมื่อทำการหาค่า HOG ในภาพขนาด 100x100 พิกเซล จะให้ขนาดเวกเตอร์ของคุณลักษณะมีจำนวนทั้งหมด 8100 ต่อภาพ

การดึงลักษณะเด่นเชิงพื้นผิวด้วยวิธีการพื้นฐาน LBP และ วิธีการ LBP ชนิด uniform patterns variant หรือ LBPu2 โดยกำหนดพารามิเตอร์ r = 3 และ p = 8 เมื่อค่า r คือ รัศมีระยะทางระหว่างพิกเซลตรงกลางและพิกเซลข้างเคียง ค่า p คือ จำนวนพิกเซลข้างเคียง จำนวนขนาดเวกเตอร์ที่ใช้ต่อภาพจะมีขนาด 256 และ 59 ตามลำดับ วิธีการ Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) (Haralick *et al*., 1973) คือ การกำหนดค่าทางสถิติจากการวิเคราะห์โครงร่างพื้นผิวภาพในทิศทางต่างๆ จำนวน 4 ทิศทางคือ 0°,45°, 90° และ 135° และระยะทางจำนวน 2 ระยะคือ d = 1 และ 2 โดยค่าของคุณลักษณะทางสถิติที่เลือกใช้นั้นคือ ค่า Contrast, Entropy และ Autocorrelation จำนวนขนาดเวกเตอร์ที่ใช้ต่อภาพจะมีขนาด 24 เวกเตอร์ วิธีการสุดท้ายคือวิธี (HOG+LBP) (ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ และภัทธกร บุบผัน, 2566) เรียกว่า Combined descriptors ด้วยขนาดของเวกเตอร์ทั้งหมด 8,356

จาก Table 3 แสดงค่าความถูกต้องของตัวบ่งชี้คุณลักษณะของแต่ละวิธีการและโมเดล CNNs ที่ ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสถาปัตยกรรม CNN นั้นมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ResNet50 ถูกนำมาวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์เพิ่มเติมใน Table 4 โดยอิงจากการวิเคราะห์แนวเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์สับสน พร้อมทั้งแสดงจำนวนภาพที่ทำนายได้ถูกต้องและค่า Precision กับ Recall โดยกลุ่ม GIII ผลการจำแนกของกลุ่มนี้อยู่ในระดับที่สมบูรณ์แบบ โดยทำนายถูกต้อง 120 จาก 120 ตัวอย่าง (Precision = 100.00%, Recall = 100.00%) แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถแยกแยะลักษณะของกลุ่ม GIII ได้อย่างแม่นยำ

Table 3 Performance Comparison of Different Feature extractor

	Feature extractor	*No. of features*	*Accuracy (%)*
Hand-crafted feature extractor	Hu moment (Hu, 1962)	7	46.67
	HOG (Dalal & Triggs, 2005)	8,100	85.00
	LBP (Ojala *et al.,* 2002)	256	72.22
	LBP^2 (Ojala *et al.,* 2002)	59	71.85
	GLCM (Haralick *et al.,* 1973)	24	58.52
	HOG+LBP (ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ และภัทธกร บุบผัน, 2566)	8356	89.81
ConvNet as fixed feature extractor	Xception	2048	98.33
	EfficientNetB0	1280	97.78
	EfficientNetB1	1280	96.67
	VGG16	512	97.78
	ResNet50	**2048**	**98.61**
	ResNet101	2048	98.06
	MobileNet	1024	98.33
	InceptionV3	2048	98.33
	InceptionResNetV2	1536	97.22

ในกลุ่ม GI โมเดลสามารถทำนายได้ถูกต้องถึง 119 ตัวอย่าง ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของโมเดลในการระบุสมาชิกกลุ่ม GI ได้อย่างแม่นยำและครบถ้วน อย่างไรก็ตาม ยังมีความผิดพลาดเล็กน้อย 1 ตัวอย่างที่ทำนายผิด ในขณะที่กลุ่ม GII ระบบสามารถจำแนกได้ถูกต้อง 116 ตัวอย่าง แสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์เมื่อโมเดลทำนายว่าเป็นกลุ่ม GII และมีค่า Recall ที่ 96.67% ซึ่งหมายความว่ามีบางตัวอย่างจริงของกลุ่ม GII ที่ระบบยังไม่สามารถตรวจจับได้ทั้งหมด แม้ว่า ResNet50 จะสามารถจำแนกกลุ่ม GI และ GII ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยรวม แต่ยังคงพบข้อผิดพลาดบางประการโดยเฉพาะในการจำแนกระหว่างกลุ่ม GI กับ GII ยังพบประเด็นที่ท้าทายเนื่องจากลักษณะรูปร่างของกลุ่ม GII ที่มีความไม่แน่นอนของรูปร่างภายในกลุ่ม ซึ่งอาจยังไม่มีความโดดเด่นเพียงพอสำหรับโมเดลในการแยกแยะอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่ลักษณะของกลุ่ม GII ซ้อนทับหรือมีความคล้ายคลึงกับลักษณะบางประการของกลุ่ม GI

Table 4 Performance evaluation of the ResNet50 model for *Acanthamoeba* spp. group classification based on confusion matrix diagonal analysis, including correctly predicted image counts, precision, and recall values.

		Prediction data					
		GI	**GII**	**GIII**	**total**	**Precision (%)**	**Recall (%)**
Actual data	**GI**	**119**	1	0	120	96.75	99.17
	GII	4	**116**	0	120	99.15	96.67
	GIII	0	0	**120**	120	100.00	100.00
	total	123	117	120	360	**Accuracy (%):** 98.61	

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *Acanthamoeba* spp. ระยะซีสต์แบบอัตโนมัติ ด้วยการสกัดคุณลักษณะด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า ร่วมกับตัวจำแนกประเภทด้วย SVM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การประมวลผลภาพเบื้องต้น การสกัดคุณลักษณะเฉพาะด้วย

โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า และการแยกกลุ่มซีสต์ด้วย SVM จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การสกัดคุณลักษณะด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ผ่านการฝึกฝนล่วงหน้า ร่วมกับตัวจำแนกประเภทด้วย SVM สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกซีสต์ของ *Acanthamoeba* spp. ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการสกัดคุณลักษณะแบบดั้งเดิม โมเดลที่มีโครงสร้างลึกเช่น ResNet50, ResNet101 และ Xception มีค่าความแม่นยำสูงที่สุด(ประมาณ 98%) สำหรับการจำแนกกลุ่มซีสต์ทั้งสาม (GI, GII, GIII) แสดงถึงความสามารถในการจับและวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์จากเมทริกซ์สับสน (Confusion Matrix) ใน Table 4 ยังชี้ให้เห็นถึงความถูกต้องของการจำแนก โดยเฉพาะในกลุ่ม GIII ที่สามารถทำนายได้ถูกต้องทั้งหมด ในขณะที่กลุ่ม GI และ GII มีอัตราการทำนายผิดเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้จึงสรุปได้ว่าระบบวิเคราะห์ภาพเพื่อการระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *Acanthamoeba* spp. นี้มีศักยภาพในการจำแนกกลุ่มซีสต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตรวจวินิจฉัยเบื้องต้นสำหรับนักจุลชีววิทยา เพื่อช่วยลดข้อผิดพลาดและภาระงานของผู้เชี่ยวชาญในห้องปฏิบัติการทางคลินิกได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมและพัฒนาการวิจัยส่วนสะสมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปีงบประมาณ 2565 ผ่านทุนวิจัยเลขที่ 293/2565

เอกสารอ้างอิง

จิตรกุล สุวรรณเจริญ, และ วัชรพงษ์ ศรีชุม. (2017). การสำรวจหาอะแคนทามีบาในแหล่งน้ำธรรมชาติจากชุมชนรอบมหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา ประเทศไทย. *วารสารสาธารณสุขศาสตร์*, *47*(3), 255–263.

ศรีศุภางค์ ทิ้วสุวรรณ, และ ภัทธกร บุบผัน. (2566). ระบบการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบอัตโนมัติของอะแคนทามีบาด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, *33*(4), 1–11.

Atasoy, H., & Kutlu, Y. (2025). CNNFET: Convolutional neural network feature extraction tools. *SoftwareX*, *30*, Article 102088. https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102088

Barata, C., Celebi, M. E., & Marques, J. S. (2019). A survey of feature extraction in dermoscopy image analysis of skin cancer. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, *23*, 1096–1109.

Buppan, P., Meeboon, C., Klamsiri, T., Promyuttana, W., Ko-amornsup, W., Kosuwin, R., & Srimee, P. (2018). การสำรวจอะแคนทามีบาในตัวอย่างน้ำสวนสาธารณะในประเทศไทย. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ (Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning)*, *9*(1), 36–45. https://doi.org/10.14456/jstel.2018.4

Chen, S., Zhao, M., Wu, G., Yao, C., & Zhang, J. (2012). Recent advances in morphological cell image analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, *2012*, 1–10.

Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 1800–1807). IEEE. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.195

Dalal, N., & Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection. In *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* (Vol. 1, pp. 886–893). IEEE.

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 248–255). IEEE.

Furey, T. S., Cristianini, N., Duffy, N., Bednarski, D. W., Schummer, M., & Haussler, D. (2000). Support vector machine classification and validation of cancer tissue samples using microarray expression data. *Bioinformatics*, *16*, 906–914.

Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *3*(6), 610–621.

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 (CVPR)* (pp. 770–778). IEEE.

Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... Adam, H. (2017). Mobile Nets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1704.04861

Hu, M. K. (1962). Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory*, *8*(2), 179–187.

Jogin, M., Mohana, M. S., Madhulika, G. D., Divya, R. K., Meghana, & Apoorva, S. (2018). Feature extraction using convolution neural networks (CNN) and deep learning. In *Proceedings of the 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)* (pp. 2319–2323). IEEE.

Ojala, T., Pietikäinen, M., & Mäenpää, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *24*(7), 971–987.

Possamai, C. O., Loss, A. C., Costa, A. O., Falqueto, A., & Furst, C. (2018). *Acanthamoeba* of three morphological groups and distinct genotypes exhibit variable and weakly inter-related physiological properties. *Parasitology Research*, *117*, 1389–1400. https://doi.org/10.1007/s00436-018-5824-8

Puls, E. da S., Todescato, M. V., & Carbonera, J. L. (2023). An evaluation of pre-trained models for feature extraction in image classification. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02037

Pussard, M., & Pons, R. (1977). Morphologies de la paroi kystique et taxonomie du genre *Acanthamoeba* (Protozoa, Amoebida). *Protistologica*, *13*, 557–598.

Rainio, O., Teuho, J., & Klén, R. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. *Scientific Reports*, *14*, Article 6086. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4510–4520). IEEE.

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556

Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, *45*, 427–437.

Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the Inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 2818–2826). IEEE.

Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. (2017). Inception-v4, Inception-ResNet, and the impact of residual connections on learning. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, *31*(1).

Tajbakhsh, N., Shin, J. Y., Gurudu, S. R., Hurst, R. T., Kendall, C. B., Gotway, M. B., & Liang, J. (2017). Convolutional neural networks for medical image analysis: Full training or fine tuning? *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1706.00712

Tan, M., & Le, Q. (2019). EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (PMLR)* (Vol. 97, pp. 6105–6114). PMLR.

ผลของความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองและพัดลมดูดอากาศต่อประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองด้วยเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

Effects of filter motor speed and air suction fan speed on dust reduction efficiency using a solar-powered air purifier

สถาพร ทองวิค[1], ประภาพร ประเสริฐพงค์[1] และอภิสิกธิ์ ภักดีแก้ว[1*]

Sataporn Tongvic[1], Prapaporn Prasertpong[1] and Aphisik Pakdeekaew[1*]

Received: 7 March 2025 ; **Revised**: 15 May 2025 ; **Accepted**: 20 June 2025

บทคัดย่อ

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในหลายพื้นที่ ดังนั้น การพัฒนาเครื่องฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบดังกล่าว งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องฟอกอากาศที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น โดยออกแบบให้มีผ้าเปียกชุบน้ำเป็นตัวกรองเพื่อดักจับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองและพัดลมดูดอากาศต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปฏิสัมพันธ์ของตัวแปร ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองและพัดลมดูดอากาศที่ 50% 75% และ 100% ขณะที่ตัวแปรตาม คือ ร้อยละของการลดฝุ่นละออง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบพัดลมที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการไหลเวียนของอากาศ ทำให้ฝุ่นละอองถูกดูดเข้าสู่ระบบมากขึ้น ในขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองมีผลต่อการลดการสะสมของฝุ่นบนตัวกรอง โดยค่าที่เหมาะสมช่วยลดการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพการกรองฝุ่นละอองอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปฏิสัมพันธ์พบว่า ความสัมพันธ์ของสองปัจจัยส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศอย่างชัดเจน โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือ ความเร็วรอบมอเตอร์ผ้ากรองที่ 75% และพัดลมดูดอากาศที่ 75% ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณฝุ่นละออง การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงระบบกรองอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบอย่างเป็นองค์รวม

คำสำคัญ: เครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์, ความเร็วรอบพัดลม, ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง, การทดลองแบบแฟคทอเรียล

Abstract

Air pollution is a major problem affecting public health in many areas. Therefore, the development of efficient and sustainable air purifiers is an important approach to reduce such impacts. This research developed a solar-powered air purifier that uses a wet cloth as a filter to capture small dust particles. The objective was to study the effects of the filter motor speed and air suction fan speed on the dust reduction efficiency of the air purifier, using a factorial experimental design to analyze the main factors and their interactions. The independent variables were the speeds of the filter motor and the air suction fan, tested at 50%, 75%, and 100%, while the dependent variable was the percentage of dust reduction. The experimental results showed that a higher fan speed increased the air flow rate, causing more dust to be drawn into the system, while the filter motor speed helped reduce dust accumulation on the filter. An optimal speed significantly reduced clogging and improved dust filtration efficiency. In addition, the analysis

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

* Corresponding author; Aphisik Pakdeekaew, E-mail: aphisik.p@en.rmutt.ac.th

of the main factors and their interactions revealed that the relationship between the two factors significantly affected the efficiency of the air purifier. The optimal settings from the experiment were a filter motor speed of 75% and an air suction fan speed of 75%, which yielded the highest efficiency in reducing dust particles. This study can serve as a guideline for designing and improving air filtration systems to be more efficient by holistically considering the factors affecting the system.

Keywords: Solar-powered air purifier, air suction fan speed, filter motor speed, factorial experiment

บทนำ

ปัญหาฝุ่นละอองในอากาศได้กลายเป็นวิกฤตสิ่งแวดล้อมและสุขภาพที่สำคัญในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นของประชากรและการจราจรสูง ฝุ่นละอองขนาดเล็ก เช่น PM2.5 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถแทรกซึมเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจและเข้าสู่กระแสเลือด ส่งผลให้เกิดโรคร้ายแรง อาทิ โรคทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด รวมถึงโรคมะเร็งปอด (Basith *et al*., 2022; Krittanawong *et al*., 2023) การลดปริมาณฝุ่นละอองในอากาศจึงเป็นความท้าทายสำคัญที่ต้องการแนวทางการแก้ไขอย่างเร่งด่วน เพื่อปกป้องสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชน

งานวิจัยหลายชิ้นได้เน้นย้ำถึงผลกระทบของฝุ่นละออง PM2.5 ต่อสุขภาพ เช่น Basith *et al*. (2022) และ Krittanawong *et al*. (2023) พบว่าฝุ่นละออง PM2.5 ส่งผลให้เกิดภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ หลอดเลือดแข็งตัว ความดันโลหิตสูง กล้ามเนื้อหัวใจตาย โรคหลอดเลือดสมอง การเกิดลิ่มเลือด และการกำเริบของภาวะหัวใจล้มเหลวในกลุ่มเสี่ยง นอกจากนี้ การทบทวนวรรณกรรมของ Tran *et al*. (2023) ยังชี้ให้เห็นว่าการลดปริมาณฝุ่นละอองในอากาศสามารถช่วยลดอัตราการเกิดโรคทางเดินหายใจได้อย่างมีนัยสำคัญ การจัดการกับปัญหานี้จึงเป็นประเด็นสำคัญทั้งในระดับนโยบายและการพัฒนาเทคโนโลยี

การใช้เครื่องฟอกอากาศเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมในการลดปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม เครื่องฟอกอากาศทั่วไปมักใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาเครื่องฟอกอากาศที่ใช้พลังงานทางเลือก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานฟอสซิลและสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาดและยั่งยืน

งานวิจัยของ Kadam *et al*. (2021) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในอุปกรณ์ฟอกอากาศ โดยพบว่าระบบฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องถึง 14 ชั่วโมง และยังคงประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองได้เทียบเท่ากับระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วไป ขณะที่ Ganesh *et al*. (2022) ชี้ให้เห็นว่าการผสานเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับการออกแบบระบบฟอกอากาศสามารถเพิ่มความสามารถในการกรองฝุ่นละอองและลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างยั่งยืน

ในด้านเทคนิคการดักจับฝุ่นละออง การใช้น้ำเป็นสื่อกลางในการดักจับฝุ่นได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพ โดย วีระ พันอินทร์ (2561) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองด้วยอุปกรณ์ดักจับฝุ่นแบบเปียก (Wet Scrubber) ที่ออกแบบสำหรับโรงสีข้าวชุมชน ซึ่งสามารถลดปริมาณฝุ่นละอองในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่น (อรรถกร อาสนคำ และคณะ, 2561) และการใช้ระบบสครับเบอร์แบบเปียกในกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (อิทธิพล กุลวงศ์, 2558) แม้ว่าปัจจุบันจะยังไม่มีงานวิจัยที่กล่าวถึงการใช้ผ้าเปียกหมุนชุบน้ำในการดักจับฝุ่นโดยตรง แต่หลักการใช้น้ำเพื่อดักจับอนุภาคฝุ่นได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูง โดยน้ำสามารถจับอนุภาคฝุ่นละอองได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติในการรวมตัวและเพิ่มมวลให้อนุภาค ซึ่งทำให้อนุภาคเหล่านั้นตกลงสู่พื้นได้ง่ายขึ้น (Polat *et al*., 2002; Johnson *et al*., 2020) ด้วยเหตุนี้ การนำผ้าเปียกหมุนชุบน้ำมาใช้เป็นตัวกลางในการดักจับฝุ่นละอองจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ และมีแนวโน้มว่าจะสามารถลดปริมาณฝุ่นละอองในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเทคนิคการดักจับฝุ่นละอองด้วยน้ำ มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นระบบฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้หมุนผ้ากรองและความเร็วของพัดลมดูดอากาศกับประสิทธิภาพการลดฝุ่นละออง ยังคงมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการดังกล่าว โดยการศึกษาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ เพื่อพัฒนาเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและตอบสนองต่อปัญหาฝุ่นละอองในอากาศได้อย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบขึ้น ดัง Figure 1 เพื่อศึกษาศักยภาพในการลดฝุ่นละอองระดับห้องปฏิบัติการ



Figure 1 Solar-powered air purifier.

เครื่องฟอกอากาศนี้ใช้แผงโซลาร์เซลล์ (Solar panel) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Off-grid โดยต่อร่วมกับฟิวส์ (Fuse) เบรกเกอร์ (Circuit Breaker) และโซล่าชาร์จเจอร์ (Solar charge controller) เพื่อควบคุมการจ่ายไฟให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่กำลังต่อเชื่อมกับวงจร ได้แก่ พัดลมดูดอากาศ และมอเตอร์หมุนผ้ากรอง รายละเอียดของอุปกรณ์เหล่านี้แสดงดัง Table 1

Table 1 Equipment details.

Equipment	Specification
Solar panel	DC solar panel, Model: TYNB, 30W
Fuse	Tongou, Model: RT18-32, 30A
DC circuit breaker	TAXNELE, Model: TXBD1-63
Solar charge controller	PWM, Model: NEW, 10A12V/ 24V + 2 USB 5V
Air suction fan	8” square exhaust fan
Dust filter cloth	50x100cm, thickness 6mm, fine filter 2.3 μ
Filter cloth rotating motor	DC motor, Model: XD-3240, 12V 30W
Particle Counter	XIAOMI, Model: GH-A13, PM2.5: ± 15%, ± 10 $\mu g/m^3$

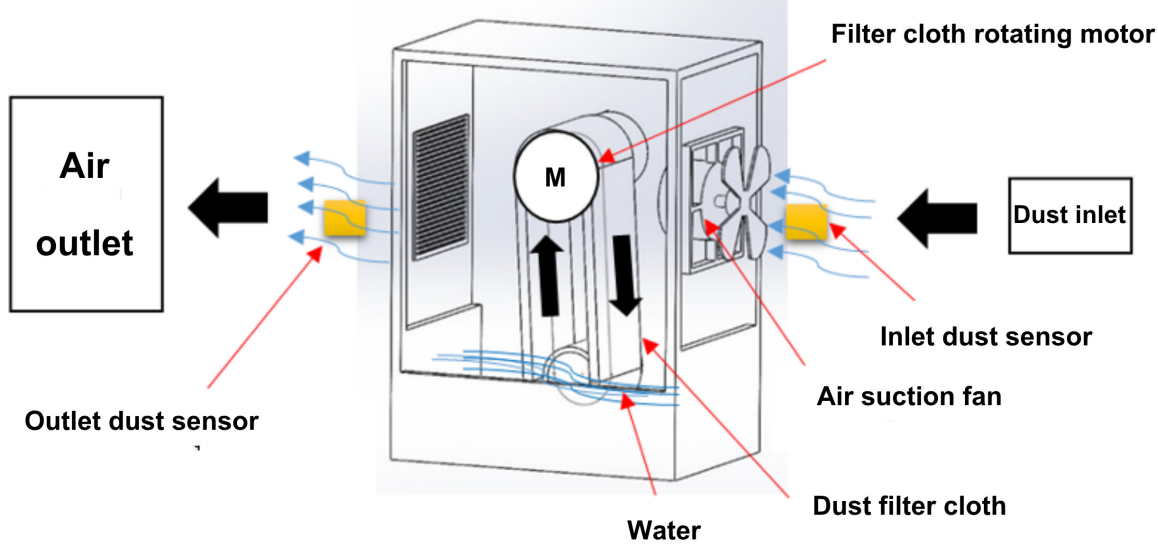


Figure 2 Solar-powered air purifier diagram.

Figure 2 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ที่อยู่ภายในเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องดังกล่าวทำงานโดยอาศัยแผงโซล่าเซลล์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อแผงโซล่าเซลล์ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์พัดลมดูดอากาศและมอเตอร์ที่ควบคุมการหมุนของแผ่นผ้ากรอง

กระบวนการทำงานเริ่มจากพัดลมดูดอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในเครื่อง อากาศที่เข้าสู่ตัวเครื่องจะถูกส่งผ่านแผ่นผ้ากรองซึ่งทำหน้าที่ดักจับฝุ่นละออง จากนั้นมอเตอร์จะหมุนแผ่นผ้ากรองลงสู่ด้านล่าง โดยส่วนล่างของแผ่นผ้ากรองจะสัมผัสกับอ่างน้ำ เพื่อชำระล้างฝุ่นละอองที่ติดอยู่บนแผ่นผ้ากรองให้ตกลงสู่อ่างน้ำ หลังจากทำความสะอาด

แล้ว แผ่นผ้ากรองจะหมุนกลับขึ้นสู่ด้านบนเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการกรองอากาศรอบถัดไป นอกจากนี้ จะมีชุดทำความสะอาดแผ่นผ้ากรองก่อนที่แผ่นผ้ากรองจะหมุนกลับขึ้นสู่ตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อให้มั่นใจว่าแผ่นผ้ากรองปราศจากฝุ่นสะสม อากาศที่ผ่านการกรองจะถูกระบายออกทางช่องระบายอากาศ ซึ่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าฝุ่นละอองเพื่อประเมินคุณภาพของอากาศก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก โดยระบบทั้งหมดนี้ใช้พลังงานจากแผงโซล่าเซลล์ที่ติดตั้งบนตัวเครื่อง

2. การวางแผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เลือกใช้ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของหลายปัจจัยต่อผลลัพธ์ โดยเฉพาะกับการวิเคราะห์ผลร่วมของปัจจัย (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551) ซึ่งระบบฟอกอากาศนี้มีองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อการดักจับฝุ่นอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ พัดลมดูดอากาศ ซึ่งควบคุมปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ และ มอเตอร์หมุนผ้ากรอง ซึ่งส่งผลต่อการดักจับฝุ่นละอองในอากาศ การเปลี่ยนค่าความเร็วของทั้งสองส่วนนี้อาจไม่ส่งผลอย่างอิสระ แต่มีผลกระทบร่วมกัน ดังนั้นการใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะช่วยให้สามารถประเมินทั้งผลเดี่ยว (Main Effects) และผลร่วม (Interaction) ของทั้ง 2 ปัจจัยได้อย่างเป็นระบบ และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้จากข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือได้

ในส่วนของวิธีการทดลอง งานวิจัยนี้ใช้วิธีการโปรยและคลุกเคล้าผงขี้เถ้ากับอากาศภายในห้องปิดขนาด 30 m^3 ให้เกิดการฟุ้งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและควบคุมปริมาณฝุ่น PM2.5 ให้มีค่าประมาณ 30 ± 2 $\mu g/m^3$ ก่อนเข้าสู่ระบบกรองอากาศ ปริมาณฝุ่นละอองได้รับการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดค่าฝุ่น PM2.5 ยี่ห้อ XIAOMI รุ่น GH-A13 ความละเอียดในการวัด PM2.5 อยู่ที่ ± 15% (± 10 $\mu g/m^3$) วัดค่าการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ TESTO 440 dP ความแม่นยำอยู่ที่ ±(0.3 °C + 0.3% of mv) ความละเอียดที่ 0.1 °C

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูล ได้มีการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งเป็นจำนวนซ้ำขั้นต่ำที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ผลด้วยสถิติ ANOVA ภายใต้แผนการทดลองแบบ Factorial ที่ใช้ศึกษาผลกระทบของหลายปัจจัยร่วมกัน โดยการควบคุมตัวแปรแวดล้อมให้คงที่ เช่น ความเข้มข้นของฝุ่นที่เข้าสู่ระบบ เพื่อให้ค่าที่ได้สะท้อนผลลัพธ์ของตัวแปรที่สนใจได้อย่างแม่นยำ จำนวน 3 ซ้ำต่อเงื่อนไขยังช่วยลดความผันแปรของค่าฝุ่นที่วัดได้ และไม่ส่งผลให้เกิดค่าเบี่ยงเบนที่สูงเกินไป ซึ่งได้รับการยืนยันจากการตรวจสอบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแจกแจงของ Residual plots ที่ปรากฏในบทวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้กำหนดตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษา 2 ตัวแปร โดยกำหนดเป็นร้อยละ 50 75 และ 100 ของค่าความเร็วสูงสุดของแต่ละอุปกรณ์ตามลำดับ ได้แก่ ความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนผ้ากรอง 650 rpm 975 rpm และ 1,300 rpm ตามลำดับ และความเร็วรอบของพัดลมดูดอากาศ 950 rpm (1,519.7 m^3/h) 1,425 rpm (1,584.4 m^3/h) และ 1,900 rpm (1,625.8 m^3/h) ตามลำดับ ส่วนตัวแปรตามที่เก็บค่ามาคือ ปริมาณฝุ่นละอองขาเข้าและขาออกจากเครื่องฟอกอากาศ แผนการทดลองดังที่กล่าวมาแสดงดัง Figure 2

Table 2 Factorial design of experiment.

Condition*	Speed	
	Filter motor	Air suction fan
1*	50% (650 rpm)	50% (950 rpm)
2*	50% (650 rpm)	75% (1,425 rpm)
3*	50% (650 rpm)	100% (1,900 rpm)
4*	75% (975 rpm)	50% (950 rpm)
5*	75% (975 rpm)	75% (1,425 rpm)
6*	75% (975 rpm)	100% (1,900 rpm)
7*	100% (1,300 rpm)	50% (950 rpm)
8*	100% (1,300 rpm)	75% (1,425 rpm)
9*	100% (1,300 rpm)	100% (1,900 rpm)

*The experiment was repeated 3 times for each test condition.

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ปริมาณฝุ่นละอองทั้งขาเข้าและขาออกจากเครื่องฟอกอากาศ (จากการทดลอง 3 ซ้ำ) ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองด้วยเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์พิจารณาได้จากร้อยละของการลดปริมาณฝุ่นละอองตามสมการที่ 3 ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณฝุ่น PM2.5 ที่ระบบกรองอากาศนี้สามารถลดลงได้ในรูปแบบร้อยละเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณฝุ่นก่อนเข้าสู่ระบบกรองอากาศ

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N} \quad (1)$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(X_i - \overline{X}\right)}{N-1}} \quad (2)$$

$$\overline{X}_R = \left| \frac{\overline{X}_{In} - \overline{X}_{Out}}{\overline{X}_{In}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ $\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล, i และ N คือ จำนวนข้อมูล, X_i คือ ข้อมูลดิบ, $S.D.$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล, $\overline{X}_{In}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่นขาเข้าเครื่องฟอกอากาศ, $\overline{X}_{Out}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่นขาออกจากเครื่องฟอกอากาศ, $\overline{X}_R$ คือ ร้อยละของการลดฝุ่นละออง

ผลจากการทดลองนี้ได้รับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนภายใต้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป เพื่อตรวจสอบผลของความเร็วรอบพัดลมดูดอากาศ (%Fan) ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง (%Motor) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (%Fan × %Motor) ต่อร้อยละของการลดฝุ่นละออง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 95% (p-value < 0.05)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากผลการทดลองที่แสดงใน Figure 3 พบว่าปริมาณฝุ่นละอองที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องฟอกอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับของความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองและความเร็วรอบพัดลม ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยแสดงผลเป็นกราฟแท่งเพื่อสะท้อนแนวโน้มของการลดลงของฝุ่นละอองในแต่ละเงื่อนไข ค่าที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พร้อมแถบสีแดงที่ระบุค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ปริมาณฝุ่นละอองลดลงในทุกเงื่อนไขที่ทดสอบ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศในการกรองฝุ่น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าปริมาณฝุ่นละอองขาเข้าอาจมีความแปรปรวนระหว่างการทดลอง เพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น จึงมีการคำนวณร้อยละของการลดลงของฝุ่นละอองในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งแสดงผลใน Figure 4 วิธีการนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศได้อย่างเป็นระบบและลดผลกระทบของความผันแปรของค่าฝุ่นละอองขาเข้าต่อผลลัพธ์ของการทดลอง

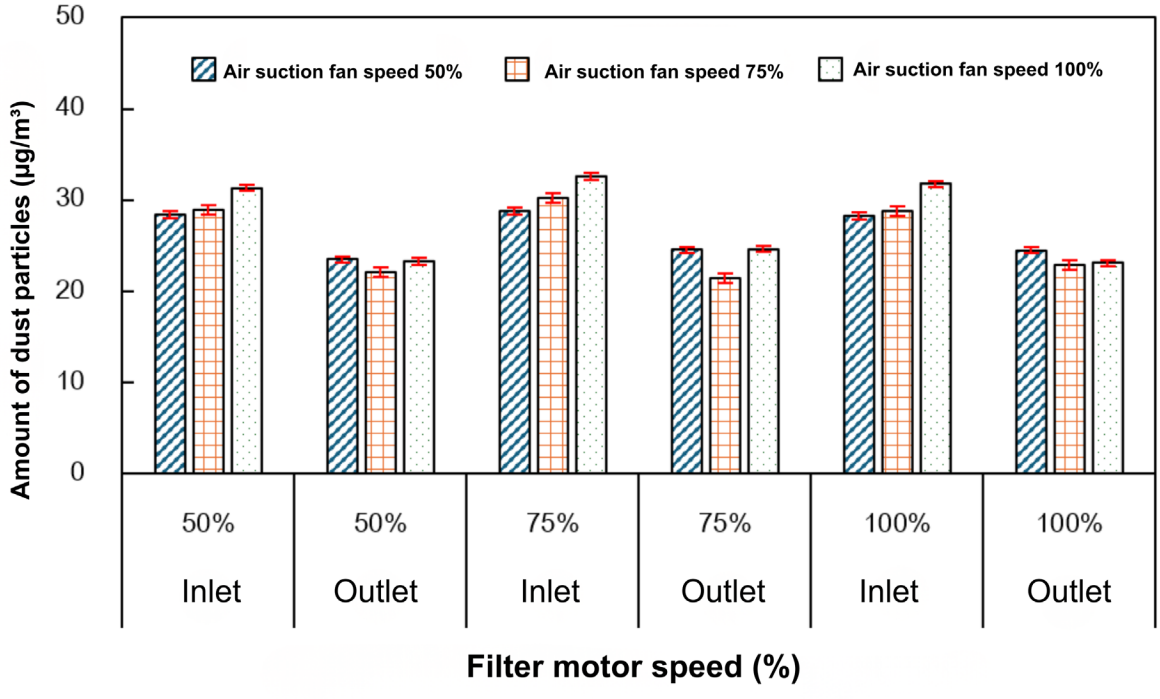


Figure 3 Amount of dust particles entering and exiting the solar air purifier in each experimental condition.

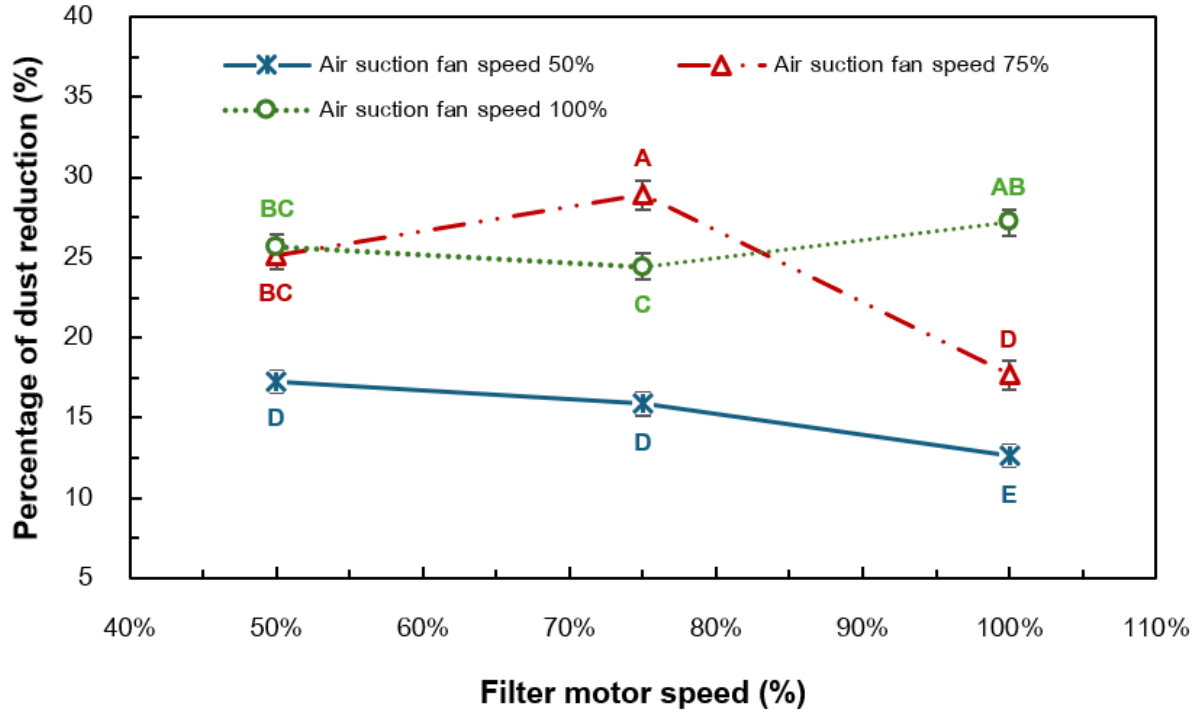


Figure 4 Percentage of dust reduction in each experimental condition.

Figure 3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณฝุ่นละอองขาออกจากเครื่องฟอกอากาศลดลงในทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อใช้ความเร็วรอบพัดลมสูงขึ้น การปรับความเร็วรอบพัดลมให้สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ฝุ่นละอองถูกดูดเข้าสู่ระบบกรองได้มากขึ้น ในทางตรงข้าม หากความเร็วรอบพัดลมสูงเกินไป อาจทำให้ระยะเวลาที่อากาศสัมผัสกับระบบกรองลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นละอองลดลงได้ (วิสูตร อาสนวิจิตร และคณะ, 2564) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเร็วรอบของพัดลมเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ เพราะประสิทธิภาพของการดักจับฝุ่นละอองยังขึ้นอยู่กับการหมุนของผ้ากรองด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบใน Figure 4 (อักษรที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)) พบว่าไม่มีค่าความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองใดที่ให้ผลลัพธ์สูงสุดในทุกระดับของความเร็วรอบพัดลมอย่างเด่นชัด แต่พบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 75% มีแนวโน้มที่ดีในหลายเงื่อนไข อาจเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนและการหมุนเวียนของผ้ากรองที่ช่วยลดการสะสมของฝุ่นละออง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของความเร็วรอบมอเตอร์เพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับผลกระทบจากความเร็วรอบพัดลมด้วย เช่น ที่ความเร็วรอบพัดลม 100% ค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดอาจแตกต่างจากเงื่อนไขอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร (Interaction Effect) ดังนั้น การกำหนดค่าที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองร่วมกันแทนที่จะพิจารณาเพียงค่าหนึ่งค่าตามลำพัง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของประสิทธิภาพการลดฝุ่นละออง ดังแสดงใน Table 3 พบว่า ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง (Motor speed) และความเร็วรอบพัดลมดูดอากาศ (Fan speed) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) โดยเฉพาะความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งมีค่า F-value สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบอย่างเด่นชัด นอกจากนี้ ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และความเร็วรอบพัดลมมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองปัจจัยต้องพิจารณาร่วมกัน มิฉะนั้นอาจทำให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นลดลงได้

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลการทดลองดังกล่าวไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรอิสระดัง Figure 5

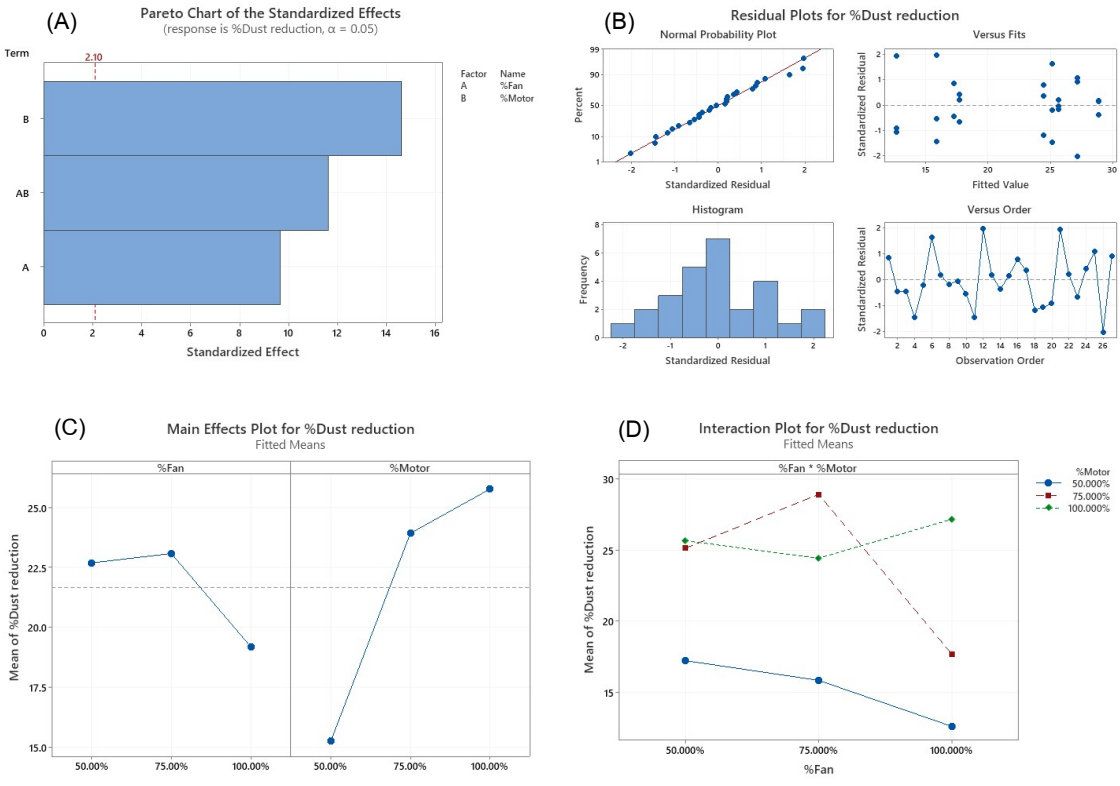


Figure 5 The impact of independent variables on the percentage of dust reduction.

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for dust reduction efficiency.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Fan speed (%Fan)	2	83.19	41.60	57.54	<0.001
Filter motor speed (%Motor)	2	566.36	283.18	391.71	<0.001
Fan × Motor	4	157.04	39.26	54.31	<0.001
Error	18	13.01	0.723	–	–
Total	26	819.61	–	–	–



Figure 6 Optimum value for solar air purifier operation.

จากผลการวิเคราะห์ Factorial ANOVA ในโปรแกรม Minitab (Figure 5 และ Table 3) พบว่า ความเร็วรอบพัดลมดูดอากาศ (%Fan) และความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง (%Motor) ส่งผลต่อร้อยละการลดฝุ่นละอองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองที่แสดงอิทธิพลเชิงสถิติสูงกว่าปัจจัยอื่น (สอดคล้องกับ Pareto chart ดัง Figure 5A) นอกจากนี้ ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบพัดลมและความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง (%Fan × %Motor) มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง แต่ขึ้นอยู่กับการทำงานร่วมกันของทั้งสองปัจจัย ในส่วนของ Residual Plots (Figure 5B) ยังแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นปกติ ซึ่งยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง และช่วยสนับสนุนข้อสรุปเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ Main Effect Plot (Figure 5C) พบว่า ทั้งความเร็วรอบพัดลมและความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง มีแนวโน้มส่งผลต่อค่าการลดลงของฝุ่นละอองมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองให้เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนี้ Main Effect Plot ยังแสดงให้เห็นว่าในบางระดับของปัจจัยหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงของอีกปัจจัยอาจส่งผลกระทบมากขึ้นหรือชัดเจนขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่พบใน Interaction Plot จากการวิเคราะห์ Interaction Plot (Figure 5D) พบว่าเส้นกราฟของบางค่าปัจจัยมีแนวโน้มตัดกัน ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างความเร็วรอบพัดลมและมอเตอร์หมุนผ้ากรอง โดยเฉพาะที่ระดับความเร็วรอบพัดลม 75% และ 100% ที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมอเตอร์ส่งผลต่อค่าการลดลงของฝุ่นละอองอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบพัดลมสูงขึ้น แรงลมที่มากขึ้นสามารถช่วยพัดฝุ่นละอองให้เข้าสู่ผ้ากรองได้ดีขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากความเร็วรอบมอเตอร์ไม่เหมาะสม ฝุ่นละอองอาจสะสมบนผ้ากรองและลดประสิทธิภาพของการกรองได้ ดังนั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองปัจจัยต้องพิจารณาไปพร้อมกันมิฉะนั้นอาจทำให้ประสิทธิภาพการกรองฝุ่นลดลงได้

เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการลดฝุ่นละอองระหว่างเงื่อนไขการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey's HSD) ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ($p < 0.05$) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขการทำงานที่ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรอง 75% และความเร็วรอบพัดลม 75% ให้ประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองสูงที่สุด (28.92%) และอยู่ในกลุ่มสถิติสูงสุด (A) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพดังกล่าวไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากเงื่อนไขที่ใช้ความเร็วรอบมอเตอร์และพัดลมที่ 100% (AB) สะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วรอบของทั้งสองอุปกรณ์จนถึงระดับสูงสุดไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นอย่างชัดเจน ในทางกลับกัน เงื่อนไขที่ใช้ความเร็วรอบพัดลมต่ำร่วมกับความเร็วรอบมอเตอร์สูง โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 100% และความเร็วรอบพัดลม 50% ให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด (12.64%) และอยู่ในกลุ่มสถิติต่ำสุด (E) ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง แต่ขึ้นอยู่กับการทำงานร่วมกันของความเร็วรอบมอเตอร์และพัดลม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ ANOVA ที่พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสองมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุด พบว่า ค่าความเร็วรอบพัดลมที่ 75% และความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 75% เป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองสูงสุด อยู่ที่ 28.92% (Figure 6) เนื่องจากเป็นจุดสมดุลระหว่างอัตราการไหลของอากาศและความสามารถในการจับฝุ่นของผ้าเปียก ความเร็วรอบพัดลม 75% ทำให้ฝุ่นเข้าสู่ระบบอย่างเพียงพอ ไม่เร็วเกินไปจนลดโอกาสที่ฝุ่นจะจับกับผ้ากรอง ส่วนความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองที่ 75% ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนผ้าที่พอดี ช่วยลดการสะสมฝุ่น และยังคงความชื้นที่เพียงพอสำหรับดักจับฝุ่นละเอียดได้ดี อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่ระดับความเข้มข้นของฝุ่นขาเข้าอยู่ในช่วง 30 ± 2 $\mu g/m^3$ ดังนั้นค่าที่เหมาะสมที่พบจึงมีความจำเพาะกับระดับฝุ่นในช่วงดังกล่าว หากใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของฝุ่นต่างกันออกไป เช่น พื้นที่ก่อสร้าง หรือในชนบท อาจต้องปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ งานวิจัยในอนาคตควรขยายผลการศึกษาในหลายระดับฝุ่นและพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติที่สามารถปรับค่าการทำงานให้เหมาะสมตามสภาพอากาศได้แบบเรียลไทม์ (Real-time)

จากการตรวจสอบลักษณะการไหลของอากาศในระบบ (Figure 1 และ 2) พบว่า มีอากาศบางส่วนไม่ได้ไหลผ่านผ้ากรองโดยตรง แต่เล็ดลอดผ่านช่องว่างด้านข้างแทน ปรากฏการณ์นี้ทำให้ฝุ่นบางส่วนไม่ถูกดักจับโดยผ้ากรอง และส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรองโดยรวมการออกแบบในอนาคตควรมีการเพิ่มแผ่นบังคับทิศทางลมและซีลขอบผ้ากรองให้แน่นหนาขึ้น เพื่อลดการรั่วไหลของอากาศและเพิ่ม

อัตราการดักจับฝุ่น การศึกษานี้ช่วยยืนยันว่าการคำนึงถึงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบพัดลมและความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองได้ นอกจากนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการกรอง และการควบคุมอัตโนมัติจะเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้เครื่องฟอกอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าความเร็วรอบพัดลมและความเร็วรอบมอเตอร์หมุนผ้ากรองเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกค่าที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองได้สูงสุด จากผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าความเร็วรอบพัดลมที่ 75% และความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 75% เป็นค่าที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด การศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของระบบและสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงเครื่องฟอกอากาศในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายสันติ ศรีทองสุก นางสาวพรทิพย์ สร้อยวงศ์ และนายประกาศิต โสหา นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเหลือในส่วนของการเก็บผลการทดลอง และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ตลอดจนให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). *การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง*. สำนักพิมพ์ท้อป.

วิสูตร อาสนวิจิตร, พานิช อินต๊ะ, วิสาข์นภัสถ์ รัตนจันทร์, และ พัทธนันท์ หรรษาภิรมย์โชค. (2564). การประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคละอองลอยภายในอากาศของเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์สำหรับใช้ภายในอาคารที่พักอาศัย. *วิศวสารลาดกระบัง*, *38*(4), 166–177.

วีระ พันอินทร์. (2561). การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นละอองด้วยระบบบำบัดอากาศแบบเปียกสำหรับโรงสีข้าวชุมชน. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, *11*(1), 61–73.

อรรถกร อาสนคำ, ชัญกฤช จันทพิมพะ, และ พิเชษฐ์ ทานิล. (2561). การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินขนาดเล็กด้วยการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, *25*(3), 178–189.

อิทธิพล กุลวงศ์. (2558). *การเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานและสมรรถนะของอุปกรณ์ดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์กับชนิดคอคอด* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี].

Basith, S., Manavalan, B., Shin, T. H., Park, C. B., Lee, W. S., Kim, J., & Lee, G. (2022). The impact of fine particulate matter 2.5 on the cardiovascular system: A review of the invisible killer. *Nanomaterials*, *12*(15), 2656.

Ganesh, P. K., Santosh, R., Srimannarayana, N. K., Sriramsrinivasan, N. K., & Manu, D. K. (2022). Solar outdoor air purifier with air quality monitor. *i-manager's Journal on Communication Engineering and Systems*, *11*(1), 6–12.

Johnson, B. D., Kranck, K., & Muschenheim, D. K. (2020). Physicochemical factors in particle aggregation. In *The biology of particles in aquatic systems* (2nd ed., pp. 75–96). CRC Press.

Kadam, R., Pojta, O., Jagtap, K., & Shoor, S. (2021). Fabrication and design of solar powered air purifier for improving air quality index. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, *8*(4), 525–534.

Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Thurston, G. D., Virani, S., & Lavie, C. J. (2023). PM2.5 and cardiovascular diseases: State-of-the-art review. *International Journal of Cardiology Cardiovascular Risk and Prevention*, 200217.

Polat, M., Polat, H., Chander, S., & Hogg, R. (2002). Characterization of airborne particles and droplets. *Particle & Particle Systems Characterization*, *19*(1), 38–46.

Tran, H. M., Tsai, F. J., Lee, Y. L., Chang, J. H., Chang, L. T., Chang, T. Y., Chung, K. F., Kuo, H. P., Lee, K. Y., Chuang, K. J., & Chuang, H. C. (2023). The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: A review of the current evidence. *Science of the Total Environment*, 166340.

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์

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) ผู้นิพนธ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลง แก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากลและนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่ละเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษรวมกับภาษาไทยในข้อความ 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 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **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 และที่อยู่ของผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้นิพนธ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ ".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. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้นิพนธ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กะชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช้คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้นิพนธ์ [Author (s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้นิพนธ์ไว้เป็นเชิงอรรถของหน้าแรก 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 ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

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

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อนและมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้นิพนธ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

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 Psychilogical Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

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

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, *18* (2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณาธิการ (บ.ก.), *ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม* (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชราภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (บ.ก.), *การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ (*น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

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

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เดลินิวส์วาไรตี้: ‘สื่อพิพิธภัณฑ์’ เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย ‘มิติใหม่’ อินเทรนด์. *เดลินิวส์*, 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/1HiTwiRh1Er73hVYlMh1cYWzQiaNl_Vc/view

Intruction 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 Psychilogical 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

Mahasarakham University Journal of Science and Technology

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 tehnology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership
Mahasarakham 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 Mahasarakham 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
Mahasarakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Mahasarakham University
Professor Dr.Anongrit Kangrang
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Orawich Goompol
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Mahasarakham University

Editorial Board
Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University Professor
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
Mahasarakham 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
Mahasarakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Nakhon Phanom University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Mahasarakham Universsity
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
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Mahasarakham 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-Decembers



วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 45 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน 2569

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN