

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 45 Number 1 January-February 2526

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

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

ที่ปรึกษา

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

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

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

กองบรรณาธิการ

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

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

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัทรวีโรไล จันทร้อย
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

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มมส. ฉบับนี้ ภาพหน้าปกได้นำเสนอผลงานวิจัยการขยายพันธุ์กล้วยไม้ “เอื้องมันปู” โดยเทคโนโลยีชีวภาพ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในสภาพปลอดเชื้อ และได้ต้นอ่อนจากการใช้อาหารเหลวที่มีส่วนผสมของน้ำมะพร้าว ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากพืชที่เป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญของไทย

เอื้องมันปู (*Robiquetia succisa*) (Lindl.) Seidenf. & GarayKuntze เป็นกล้วยไม้อิงอาศัย (epiphyte) ที่มีถิ่นกำเนิดและการแพร่กระจายอยู่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบมากในไทยและมาเลเซียตามป่าดิบชื้น มักเกาะอิงอาศัยบนต้นไม้ใหญ่ ชอบความชื้นสูงและแสงสว่างเพียงพอ ดอกออกเป็นช่อห้อยลง ต้นหนึ่งมักมีหลายช่อ แต่ละช่อมีดอกจำนวนมาก เป็นกล้วยไม้ป่าที่มีความงดงาม ออกดอกในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน

นอกจากนี้ผลงานวิจัยสาขาต่างๆได้นำเสนอให้ผู้อ่านได้เรียนรู้ถึงการค้นพบใหม่ๆทางวิทยาศาสตร์ กระทั่งผลงานวิจัยที่นำเสนอเชิงนโยบายหรือการนำไปประยุกต์ใช้ หรือต่อยอดงานวิจัยในสาขาที่สนใจ สืบต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ประเทพา
บรรณาธิการ

สารบัญ

Agricultural Science

- การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง 1
Optimization of crispy pork stick production by microwave heating using response surface method
นันทา เบ็งเนตต์ และ ดรุณี นาคเสวี
Nantha Pengnet and Darunee Naksavi
- ความชุกและความหลากหลายของ *Wolbachia* ในประชากรยุงธรรมชาติ (Diptera: Culicidae) 11
จากภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย
Prevalence and diversity of *Wolbachia* in wild mosquito (Diptera: Culicidae) populations from the lower central Thailand
สรลวิชญ์ จีนแสร์, สุวิชญา ประทุมราช, ภัคพล ท้าวเวชสุวรรณ และ ภาณุพงษ์ ทองเปรม
Sarunwitch Cheensae, Suwitchaya Pratumrach, Pakkapol Thaowetsuwan and Panupong Thongprem
- ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของกระเทียมไทย 19
Effect of storage conditions on the stability of physical and chemical characteristics of Thai garlic
วันปิติ ธรรมศรี, จามรี กลางคาร, ฐิตินาถ สุขคนเขตร์ และ ฐิติพร ลิณีธูภา
Wanpiti Thammasri, Chamaree Klangkan, Thitinat Sukonket and Thitiporn Linitda

Biological Science

- กายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบเนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชวงศ์เข็ม (Rubiaceae) 26
บางชนิดใหม่มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
Comparative leaf epidermal anatomy of some species of the family Rubiaceae in Roi Et Rajabhat University
สุทาร์ตน์ คนขยัน, เบญญาภา พลศรี และ ภานิดา เถาว์ชาติ
Sutarat Khonkayan, Benyapa Ponsri and Panida Taochalee
- การพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว 37
Development of skin serum products from tangor extract (*Citrus nobilis* Lour)
แสงสิทธิ์ กฤษฏี, ชมัยพร บุญสมการ, เจนจิรา แสนบุรี, สิริภรณ์ สมิ อัครปัญญาพร,
สลิลทิพย์ กุลศิลาภิรักษ์ และ อนงค์นุช ทุมปัต
Saengsit Kritsadee, Chamiporn Boonsompam, Janejira Sanburee, Siriparas Assavapanyaporn,
Salinthip Kunsilarak and Anongnooch Thumpad
- ประสิทธิภาพของอาหารเหลวต่อการเจริญและพัฒนาของต้นอ่อนเอื้องมันปู (วงศ์กล้วยไม้) 44
ในสภาพปลอดเชื้อ
Liquid media cultures are effective on growth and development of *Robiquetia succisa* (Lindl.) Seidenf. & Garay (Orchidaceae)
หนึ่งฤทัย จักรศรี, อรญา คำมะปะนา, อนุพันธ์ กงบังเกิด และ ธนากร วงษศา
Nuengruethai Jacksri, Aoraya Kammapana, Anupan Kongbangkerd and Thanakorn Wongs

Computer and Information Technology

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการทำเหมืองกฎความสัมพันธ์ระหว่าง Apriori, FP-Growth, 53
FP-Max และ H-Mine สำหรับการวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า
Performance comparison of association rule mining algorithms among Apriori, FP-Growth, FP-Max, and H-Mine for market basket analysis
กริชบดินทร์ ผิวหอม
Kritbodin Phiwhorm

สารบัญ

- การวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักเรียนต่อการจัดการเรียนการสอนโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล 62
Analyzing students' opinions on teaching and learning management using data mining techniques
ธนัทไชยพงษ์ เพชรสงคราม และ วงกต ศรีอุไร
Tanutchaipong Phetsongkram and Wongkot Sriurai
- การวิเคราะห์ปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ 73
โดยใช้สมาร์ทโฟน
An analysis of interaction design factors for online data collection applications using smartphones
สุนันทา วงศ์จตุรภัทร
Sununthar Vongjaturapat
- การสร้างกฎความสัมพันธ์ของปัจจัยการเกิดภาวะซึมเศร้าหลังคลอด 92
Association rules of factors influencing postpartum depression
อาทิตยาพร โรจรัตน์, วรารัตน์ สงฆ์แบน, ภัทรลดา นามเสาร์, ธนพล ศรีบาล, นัฏฐณิชา วัฒนะงาม,
รังสรรค์ บุตรแก้ว และ วรวิทย์ สังฆทิพย์
Artitayaporn Rojarath, Wararat Songpan, Phatlada Namsao, Thanapon Sonban,
Natthanicha Watthanangam, Rangsang Butkaew and Worawith Sangkatip
- Engineering**
- การเพิ่มสมรรถนะการทำนายเสถียรภาพและระยะวิกฤติของลาดดินโดยใช้การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ 109
และคุณสมบัติพหุนาม
**Enhanced prediction of slope stability and failure distance using hyperparameter tuning
and polynomial features**
พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณา, พรเกษม จงประดิษฐ์, จิรวัดน์ ศุภโกศล, ปิโยรส ทะเสนหอด,
รักษ์ศิริ สุขรักษ์ และ นัฐวุฒิ เหมะธูลิน
Pattanasak Chaipanna, Pornkasem Jongpradist, Jirawat Supakosol, Piyoros Tasenhod,
Raksiri Sukkarak and Nattawut Hemathulin
- Environmental Science**
- การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ในการตรวจวัดและประเมินปริมาณฝุ่นละออง 122
ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
**Application of LIDAR technology for monitoring and assessing particulate matter
at Kanchanaburi Rajabhat University**
อาทิตย์ เรืองศรี, พัฒน์ศรีญ์ เลหาไพบูลย์ และ อรณิชา คงวุฒิ
Artit Ruangsri, Phatsaran Laohhapaiboon and Ornnicha Kongwut

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of crispy pork stick production by microwave heating using the response surface method

นันทา เป็งเนตร์ และดรุณี นาคเสวี*¹

Nantha Pengnet^{1*} and Darunee Naksavi¹

Received: 11 September 2024 ; Revised: 20 December 2024 ; Accepted: 23 January 2025

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบเป็นโจทย์วิจัยที่ทางผู้ประกอบการ บริษัทธองกวาง กรีนฟู้ด จำกัด ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อหมูแปรรูปในรูปแบบใหม่ที่อุดมไปด้วยคุณค่าอาหารและสามารถทานร่วมกับอาหารเช้าได้ในสภาวะที่เร่งรีบของการใช้ชีวิตประจำวัน งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟเพื่อวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) ออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) และแปรผันตัวแปรในแต่ละปัจจัยประกอบด้วยปริมาณเนื้อหมู 70.0-75.0% (w/w) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 4.0-8.0% (w/w) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 0.18-0.22% (w/w) ผลการศึกษาพบว่าค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_2) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9996 และ 0.9659 ตามลำดับ การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (lack of fit) พบว่าโมเดลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ค่าที่ได้จากสมการทำนายประกอบด้วยปริมาณเนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 0.18% คุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย ค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี พลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม ไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคลเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัมและใยอาหาร 0.61 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 18.5 เดือน และมีค่า aw เท่ากับ 0.28 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผู้ประกอบการสามารถนำผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พัฒนามาดำเนินการต่อยอดในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: หมูแท่งอบกรอบ, ไมโครเวฟ, โปรตีนถั่วเหลือง, คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส, วิธีการทางพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

The development of crispy pork stick products is a research topic that Songkwang Green Food Co., Ltd. wanted to develop a new processed pork product that is rich in nutrients and can be eaten with breakfast in the hustle and bustle of daily life. This research aimed to determine the optimization conditions of the crispy pork sticks process with the microwave method, which analyzed the nutritional value and shelf life. The central composite design (CCD) was designed with the variables in each factor including 70.0-75.0% pork (w/w), 4.0-8.0% soy protein extract (w/w), and carboxymethyl cellulose 0.18-0.22% (w/w). The lack of fit test showed that the model did not differ statistically significantly ($p>0.05$), and the value obtained from the prediction equation consisted of 70% pork, 7.57% soy protein extract, and 0.18% carboxymethylcellulose. The product had the energy from fatty 104 kcal, total fat 11.5 g, saturated fat 4.25 g,

¹ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

¹ Faculty of Agriculture, Uttaradit Rajabhat University, Muang District, Uttaradit, 53000

* Corresponding author, e-mail: darunee.nak@uru.ac.th

cholesterol 79.8 mg, protein 52.3 g, total carbohydrate 24.8 g, and dietary fiber 0.61 g / 100 g sample, respectively. The crispy pork sticks packaged in nitrogen-filled aluminum foil bags (30 g) had a shelf life of 18.5 months, and the aw was 0.28 at 35 °C. The entrepreneurs can take the newly developed and commercialized products.

Keywords: Crispy pork stick, microwave, soy protein, carboxymethyl cellulose, response surface methodology

บทนำ

บริษัท รังนก ก๊อปปี้ จำกัด จัดตั้งโดยคุณธงไชยพัฒน์ ตีลาธนาชัยและหุ้นส่วนธุรกิจ เป็นผู้ประกอบการที่เริ่มต้นการทำธุรกิจแปรรูปเนื้อสัตว์ มีแนวความคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบ (crispy pork stick) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อหมูแปรรูปที่ไม่ใช้วิธีการทอดแต่จะใช้วิธีการอบจนสุก เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่เน้นการรับประทานอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ลดการสะสมของไขมันเนื่องจากการทอด ประกอบด้วยแหล่งโปรตีนสูง ผลิตภัณฑ์ยังรับประทานง่าย (ready to eat) สะดวกสบายต่อการบริโภค (convenience in consumption) และเป็นรูปแบบใหม่ของสินค้าที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในยุคดิจิทัล

ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปไขมันต่ำเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากการบริโภคไขมันจากเนื้อสัตว์ในปริมาณมากนำไปสู่การเกิดโรคในมนุษย์ ปัจจุบันมีการใช้สารทดแทนไขมัน (fat replacer) ในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างกว้างขวางเพื่อลดหรือทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปส่งผลให้ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้ส่วนผสมอาหารที่ให้สมบัติทางหน้าที่คล้ายไขมัน (functional ingredient) เช่น โปรตีน แป้ง และสารให้ความข้นหนืดหรือความคงตัว (thickening agent or stabilizer) ได้แก่ บุก กัม คาราจีแนน เพกติน และเจลาติน (Hurler, 2012) ผลิตภัณฑ์เนื้อที่อยู่ในกลุ่มเนื้อบดละเอียดแบบอิมัลชันเกิดจากการลดขนาดของเนื้อสัตว์ให้มีขนาดย่อยเล็กลงด้วยการบดสับให้ละเอียด ลักษณะการเกิดอิมัลชันในผลิตภัณฑ์เนื้อ (emulsion meat หรือ meat batter) ทำให้สามารถรักษาเสถียรภาพได้ โดยที่อนุภาคของไขมันไม่แยกชั้นออกมารวมกัน เนื่องจากอนุภาคไขมันถูกกักไว้ภายในโครงร่างตาข่าย 3 มิติของโปรตีนเจล (gelled protein - water matrix) ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของโปรตีนไมโอซินที่หุ้มอนุภาคไขมันด้วยความร้อนในขณะสับผสมและขณะทำให้สุก (André & Shai, 1997)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxy methyl cellulose) เป็นพอลิเมอร์ประจุลบที่ละลายน้ำได้ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับโปรตีนจากเนื้อสัตว์โดยการเชื่อมข้าม (cross-link) กับประจุบวกของหมูคาร์บอกซี (carboxyl group) ที่เป็นโครงสร้างของกรดอะมิโนในโปรตีนไมโอไฟบริลลา (myofibrillar protein) ปฏิสัมพันธ์นี้สามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ (Minyi

& Hanne, 2017) มีการนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาเป็นสารทดแทนไขมันในไส้เนื้อทอดเพื่อปรับปรุงลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ เนื้อสัมผัส สี รสชาติ และความชุ่มฉ่ำ ระดับความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมัน คือ 0.5%-3.0% แต่การใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับมากกว่า 0.5% ทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของผลิตภัณฑ์คุณภาพทางประสาทสัมผัส และเนื้อสัมผัสเมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อน (Monika et al., 2015) ในการปรับโครงสร้างของไขมันหรือการทดแทนไขมันด้วยองค์ประกอบอื่น เช่น สารละลายไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้เกิดส่วนเกินของน้ำในระบบอิมัลชันและเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้ออิมัลชันเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไปในทางไม่พึงประสงค์ การเติมโปรตีนจากนมหรือโปรตีนถั่วเหลืองสามารถเปลี่ยนโครงสร้างร่างแหของโปรตีนระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปมีเนื้อสัมผัสดีขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแน่น เด้ง และมีความแข็งแรงของเจลที่มากขึ้น (Asuming-Bediako et al., 2014)

กลไกการจับไขมันและรักษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปแบบอิมัลชันมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เนื้อบดลดขนาดส่วนใหญ่ประกอบด้วยไขมัน 20-35% และโปรตีน 10-15% โดยน้ำหนัก ซึ่งโปรตีนในผลิตภัณฑ์จะทำหน้าที่รักษาน้ำหนักให้เป็นปกติ 50-60% ของน้ำหนักสูตรผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนระหว่างการแปรรูปส่วนใหญ่เกิดปัญหาการแยกชั้นของอิมัลชัน เกิดการแยกตัวของชั้นไขมันในระหว่างการปรุงสุกทำให้เกิดการสูญเสียที่มีมูลค่ามากโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ที่กำลังการผลิตสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ โดยการตรวจสอบการแปรผันปริมาณของสูตรที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ส่งผลต่อคุณภาพทางด้านเคมีกายภาพโดยใช้วิธีการตอบสนอง เพื่อพัฒนาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่มีปริมาณไขมันลดลงโดยการใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารทดแทนไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองทำหน้าที่ปรับปรุงเนื้อสัมผัสและการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

การทดลอง

1. การเตรียมวัตถุดิบและการกำหนดสภาวะของการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

เนื้อหมูตัดแต่งในส่วนสันนอกซื้อจากตลาดสดเทศบาลอำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน นำมาหั่นเป็นชิ้นและบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Multifunctional cutter รุ่น QS5A เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทำการผลิตโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสจากบริษัททีเคโซลูชัน แอนด์ ซัพพลายส์ จำกัด ประเทศไทย

กำหนดปัจจัยของการศึกษากระบวนการผลิต โดยนำสูตรพื้นฐานของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบประกอบด้วยเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองสกัด คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส และเครื่องปรุงรส นำมาบดผสมด้วยเครื่อง Multifunctional cutter รุ่น QS5A เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแท่งโดยกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งครั้งที่หนึ่งโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และพักให้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการอบแห้งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และนำผลิตภัณฑ์ไปอบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที กระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ได้รับการออกแบบโดยอิงจากผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า (นันทา เบ็ญเนตร์ และคณะ, 2563) ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการที่ตอบสนองต่อความต้องการทางเทคโนโลยี ผลิตภัณฑ์ที่ได้บรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และรอการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ

ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) โดยออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) ทำการแปรผันระดับตัวแปรในแต่ละปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเนื้อหมู 70.0-75.0% (w/w) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 4.0-8.0% (w/w) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 0.18-0.22% (w/w) ทำการศึกษาปัจจัยละ 5 ระดับ (ค่ารหัส -1.414, -1, 0, 1, 1.414) โดยทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง (ค่ารหัส 0) จำนวน 2 ซ้ำ รวมได้ 12 สิ่งทดลอง

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทางด้านเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

นำผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยวิธี AOAC (2000) การวิเคราะห์ค่าสี L^*

a^* b^* โดยเครื่องวัดค่าสี Hunter Lab ยี่ห้อ Colour flex รุ่น miniscan Xp plus และค่าความแข็ง (hardness) โดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA.Xplus (Stable Micro System, England) ทำการวัดตัวอย่าง 5 ซ้ำ ใช้หัววัด knife edge with slotted Insert (HDP/BS) ใช้แรง 25 kg test speed เท่ากับ 2.0 mm/s post test เท่ากับ 10.0 mm/s ระยะห่างเท่ากับ 5 mm และ Trigger force เท่ากับ 25 g รายงานผลในหน่วย kgf/mm^2

การคัดเลือกตัวแปรตอบสนองในการสร้างแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนอง การวิเคราะห์สมการแบบถดถอยแบบพหุ (multiple linear regression) เพื่อทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการตอบสนอง แบบสมการพหุนามกำลังสอง (second-order polynomial) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง

$\beta_0 \beta_i \beta_{ii} \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของจุดตัดแกน Y สมการเส้นตรงสมการอันดับสองและเทอมอิทธิพลร่วม

ในการประเมินสภาวะที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบจากการสร้างแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนองดำเนินการโดยใช้เกณฑ์ในด้านของค่าความแข็งที่มีค่าสูงสุดและปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ ในการทวนสอบความแม่นยำของสมการทำนายโดยการทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Y_{exp}) และแทนค่าตัวแปรที่ศึกษา (X_{1-3}) ในสมการที่วิเคราะห์ได้ และมีความน่าเชื่อถือ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (Y_{pred}) คำนวณค่า Root Mean Square (RMS) ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายจาก สมการ (2)

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{\sum [(Y_{exp} - Y_{pred})^2]}{N}} \quad (2)$$

เมื่อ Y_{exp} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง

Y_{pred} คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ตามฉลากโภชนาการ ได้แก่ ค่าพลังงานทั้งหมด พลังงานจากไขมัน ไขมันทั้งหมดและไขมันอิ่มตัว โคลเลสเตอรอล โปรตีน คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โยอาหาร น้ำตาล โซเดียม วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 แคลเซียมและเหล็ก โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบดำเนินการโดยบรรจุผลิตภัณฑ์ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำหนักโดยปริมาณของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 30 กรัม ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 สัปดาห์ สุ่มตัวอย่างตรวจสอบคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี $L^* a^* b^*$ โดยเครื่องวัดค่าสี Hunter Lab ยี่ห้อ colour flex รุ่น miniscan Xp plus ค่า water activity (a_w) ด้วยเครื่อง AQUALAB รุ่น series 3 ค่าความแข็ง (hardness) โดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA.Xplus ยี่ห้อ Stable Micro System และค่า thiobarbituric acid-reactive substance (TBARs) โดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Wenjiao (2013) และการทำนายอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเร่งโดยใช้ค่า Q10 (Accelerated shelf-life testing) (Phimolsiripol and Suppakul, 2016)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณในรูปแบบที่ตอบสนองด้วยโปรแกรม Design Expert 5 Software (StatEase, Inc. Minne-apolis, MN, USA) เพื่อหาความสัมพันธ์สมการถดถอยแบบพหุ เพื่อทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determinate; R^2) ของสมการที่ตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของตัวแปรตอบสนองที่ใช้เป็นค่าสหสัมพันธ์ในการเลือกค่าตอบสนอง (Y)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทางด้านเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

การผลิตหมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นที่ผิวตอบสนองจากการแปรผันปริมาณของเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) ที่มีต่อค่าความแข็ง ค่าสี $L^* a^* b^*$ และค่าปริมาณความชื้น (Table 1) ผลการวิเคราะห์

สมการถดถอยแบบพหุแบ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear effect) ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic effect) และอิทธิพลระหว่างปัจจัย (interaction effect) โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือเทอมกำลังหนึ่ง (X_1, X_2, X_3) ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหรือเทอมกำลังสอง (X_1^2, X_2^2, X_3^2) และอิทธิพลระหว่างปัจจัยหรือเทอมที่มีอิทธิพลร่วมกัน (X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3) โดยการประเมินทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการพบว่า ค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_5) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9996 และ 0.9659 ตามลำดับ (Table 2) การพิจารณาความน่าเชื่อถือของสมการจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ถ้าค่าตัวเลขเข้าใกล้ 1 หมายความว่าสมการมีความน่าเชื่อถือเหมาะสมที่จะนำมาทำนายค่าได้ และค่า model significance ของค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงถึงความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่า X และค่า Y อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (lack of fit) พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายค่าความแข็งและค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบ โดยค่า ANOVA เป็นเกณฑ์สำหรับการวัดความเหมาะสมของแบบจำลอง ซึ่งหากค่าการทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) มีนัยสำคัญทางสถิติแสดงว่าแบบจำลองนั้นไม่เหมาะสมเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการเลือกใช้ตัวแปรที่ไม่เหมาะสม (Kutner *et al.*, 2004; Derringer & Suich, 1980) ค่าความแข็งและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบอยู่ในรูปของสมการรูปแบบกำลังสอง (quadratic equation) ซึ่งเป็นสมการศึกษปัจจัยและการตอบสนองพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อนำสมการถดถอยแบบพหุมาสร้างกราฟพื้นที่ตอบสนองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อหมู (X_1) ปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และปริมาณคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) พบว่าการเพิ่มปริมาณเนื้อหมูและปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Figure 1) เป็นผลเนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำหน้าที่จับตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเจลที่ดีและสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของหมูแห้งอบกรอบได้ดีขึ้น นอกจากนี้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดจัดอยู่ในกลุ่มสารทดแทนไขมันทำหน้าที่ดูดซับน้ำโดยจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำถูกจับไว้ในโมเลกุลของโปรตีนจึงสามารถใช้เป็นสารทดแทนไขมันได้ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2557) ไข่จะเดี่ยวก่อนการเพิ่มปริมาณเนื้อหมูและปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดส่งผลทำให้ค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

(Figure 2) ซึ่งในขั้นตอนของการบดผสมทำให้โปรตีนจากเนื้อหมูเกิดการสูญเสียสภาพตามธรรมชาติของโปรตีนทำให้ส่วนของไฮโดรโฟบิกเปิดตัวออกมา ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง อัตราการพองตัวลดลง โปรตีนจึงไม่ดูดซับน้ำแต่สร้างเจลเป็นโครงสร้างลักษณะคล้ายร่างแหที่สามารถห่อหุ้มน้ำไขมันและของแข็งให้อยู่รวมกันได้ส่งผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งโปรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีเนื่องจากในโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงสามารถจับน้ำและไขมันให้คงตัวอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยในด้าน การปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส ทำให้มีความชุ่มฉ่ำและลดการสูญเสียน้ำหนักหลังผ่านการทำให้อุณหภูมิสูง (Petracci *et al.*, 2013) ขณะเดียวกันคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารทดแทนไขมันและเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูป การใช้คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสและความชุ่มฉ่ำของผลิตภัณฑ์เนื้อได้

สมการถดถอยของค่าสี L^* และ a^* อยู่ในรูปแบบอิทธิพลระหว่างปัจจัย (interaction effect) ระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง (X_2) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.3623 และ 0.5765 ตามลำดับ ในขณะที่ยวกันสมการถดถอยของค่าสี b^* อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear effect) เป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.6663 และสมการมีค่า model significance เท่ากับ 0.0261 ($p < 0.05$) แสดงถึงค่า Y และค่า X มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (Table 2) แต่ค่าสี L^* a^* และ b^* มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจน้อยกว่า 0.75 ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายข้อมูลได้อย่างเที่ยงตรง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลิตภัณฑ์แสดงผลของความค่าสี L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างไม่แตกต่างกัน

การทวนสอบความแม่นยำของสมการที่เลือกไว้ 2 สมการ คือ สมการของค่าความแข็งและสมการค่าปริมาณความชื้น (Table 3) โดยวิเคราะห์ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (actual value) รวมทั้งค่าตัวแปรที่ศึกษา (X_{1-3}) ในสมการที่เลือกได้เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (predicted value) นำมาคำนวณค่า root mean square (RMS) ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการ ซึ่งจากการพิจารณา ค่า RMS พบว่าค่าความแข็งและ

ค่าปริมาณความชื้น มีค่าเท่ากับ 0.0030% และ 0.0038% ซึ่งค่า RMS บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการต่ำกว่า 20% แสดงถึงค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อย (Julian, 2004) จากผลการทดลองยืนยันว่าสมการที่เลือกทั้ง 2 สมการคือ ค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_5) มีความเหมาะสมและแม่นยำเพียงพอที่จะนำไปใช้กำหนดสูตรของส่วนผสมสำหรับการผลิตหมูแห้งอบกรอบได้

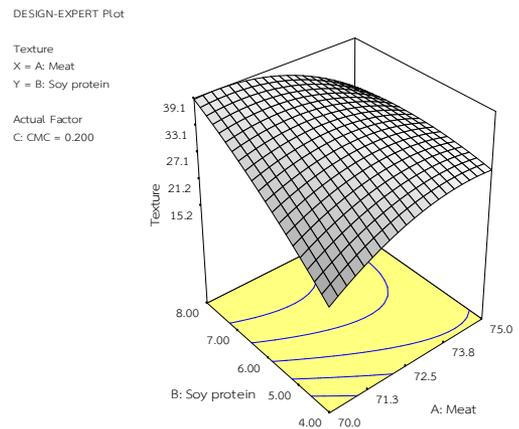


Figure 1 Relation response surface between meat (X_1) soy protein (X_2) and CMC (X_3) on hardness (Y_1) of crispy pork stick product

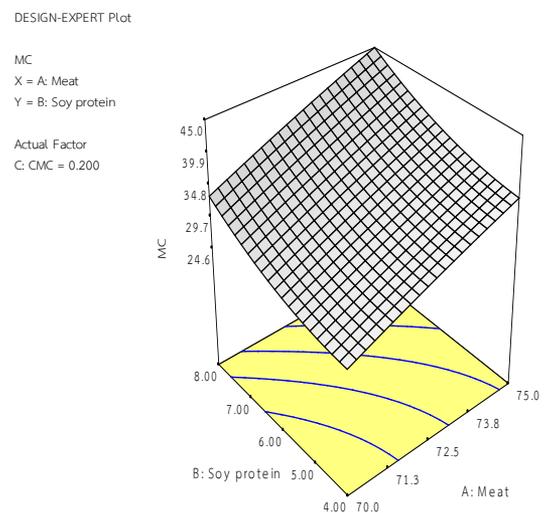


Figure 2 Relation response surface between meat (X_1) soy protein (X_2) and CMC (X_3) on moisture (Y_5) of crispy pork stick product

Table 1 Central composite design and response variables of crispy pork stick product

Run no.	Block	Independent variable			Response variables				
		X ₁	X ₂	X ₃	Hunter Lab	Hunter Lab			Moisture
					(Kgf/mm ²)	L* value	a* value	a* value	content(%db)
1	1	70.00	8.00	0.22	3.15±0.60	47.23±0.47	15.28±0.19	29.17±0.48	45.30±0.22
2	1	70.00	4.00	0.18	2.78±0.03	43.27±0.54	14.68±0.10	27.02±0.47	36.16±0.74
3	1	72.50	6.00	0.20	1.17±0.30	42.70±0.19	13.86±0.21	25.23±0.41	34.33±0.53
4	1	75.00	8.00	0.18	2.23±0.07	47.02±0.15	13.02±0.10	27.83±0.28	36.01±0.47
5	1	75.00	4.00	0.22	3.12±0.06	42.09±0.14	14.11±0.12	26.05±0.21	37.13±0.42
6	2	72.50	6.00	0.20	1.16±0.26	50.30±0.19	12.49±0.06	26.47±0.27	31.60±0.75
7	2	68.96	6.00	0.20	1.95±0.43	49.03±0.34	12.51±0.29	27.24±0.45	23.20±0.01
8	2	72.50	3.17	0.20	1.94±0.12	46.80±0.29	11.22±0.06	25.05±0.47	29.15±0.54
9	2	72.50	6.00	0.17	2.25±0.18	45.69±0.74	15.00±0.15	27.78±0.32	33.91±0.62
10	2	76.04	6.00	0.20	2.12±0.39	50.58±0.43	12.77±0.14	27.65±0.42	39.31±0.25
11	2	72.50	6.00	0.23	2.51±0.32	50.68±0.38	11.05±0.11	27.03±0.10	42.02±0.20
12	2	75.50	8.83	0.20	3.00±0.69	55.50±0.47	12.90±0.32	30.33±0.48	41.90±0.95

Data are presented as means ± standard error

Table 2 Regression model of crispy pork stick product

Regress Coefficients	Hardness (Kgf/mm ²)	Physicochemical properties			Moisture content (%db)
		Hunter Lab			
		L* value	a* value	b* value	
β_0 - Constant	1.18	47.57	13.24	27.24	32.05
β_1 - Meat (%)	0.06	0.10	0.002	-0.22	5.70
β_2 - Soy protein (%)	0.37	2.65	0.60	1.42	4.51
β_3 - CMC (%)	0.09	0.76	-1.40	-0.08	2.87
β_{11}	0.42				0.065
β_{22}	0.64				2.20
β_{33}	0.59				3.42
β_{12}	-0.22		-0.182		0.30
β_{13}	0.50		0.720		2.50
β_{23}	0.21	2.59	0.800		7.78
Model significance	0.0020*	0.2834	0.4546	0.0261*	0.1447
Lack of fit	0.0967	0.8480	0.4710	0.5727	0.3467
R-Squared	0.9996	0.3623	0.5765	0.6663	0.9659
Adj R- Squared	0.9976	0.1231	0.0684	0.5412	0.8123

* Significant at p<0.05

Table3 Verification of the equation response actual value and predicted value and root mean square (RMS) of hardness (Y_1) and moisture content (Y_5)

Standard order	Variable			Response					
				Hardness (Y_1)			Moisture content (Y_5)		
	X_1	X_2	X_3	Actual value	Predicted value	Residual	Actual value	Predicted value	Residual
1	75.00	8.00	0.18	2.23	2.24	-0.013	36.00	36.10	-0.0469
2	75.00	4.00	0.22	3.12	3.13	-0.013	37.10	37.20	-0.0469
3	70.00	8.00	0.22	3.15	3.16	-0.013	45.30	45.30	-0.0469
4	70.00	4.00	0.18	2.78	2.79	-0.013	36.20	36.20	-0.0469
5	72.50	6.00	0.20	1.95	1.94	0.013	34.30	34.10	0.1880
6	69.00	6.00	0.20	2.12	2.11	0.013	23.20	23.20	0.0469
7	76.00	6.00	0.20	1.94	1.93	0.013	39.30	39.30	0.0469
8	72.5	3.17	0.20	3.00	2.99	0.013	29.10	29.10	0.0469
9	72.5	8.83	0.20	2.25	2.24	0.013	41.90	41.90	0.0469
10	72.5	6.00	0.17	2.51	2.50	0.013	33.90	33.90	0.0469
11	72.5	6.00	0.23	1.16	1.18	-0.018	42.00	42.00	0.0469
12	72.5	6.00	0.20	1.17	1.18	-0.0083	31.60	31.80	-0.2820
				RMS(%)		0.0030	RMS (%)		0.0038

จากผลการทดลองสามารถทำนายระดับที่เหมาะสมสำหรับการผลิตหมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ จากโปรแกรม Design Expert โดยการนำ ค่าสมการถดถอยแบบพหุมา กำหนดปัจจัยตัวแปรต้น ได้แก่ ปริมาณของเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีผลต่อตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความแข็งและปริมาณความชื้น เมื่อนำสมการถดถอยแบบพหุมาหาค่าที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรหมูแห้งอบกรอบ โดยกำหนดค่าเป้าหมายด้านเนื้อสัมผัสที่มีค่าความแข็งมากที่สุดและมีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด พบว่าการใช้เนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 0.18% เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตหมูแห้งอบกรอบ

2. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟจากตัวอย่าง 100 กรัม พบว่ามีค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี โดยมีพลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม และไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคลเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม

คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัม โยอาหาร 0.61 กรัม น้ำตาล 24.2 กรัม โซเดียม 1579 มิลลิกรัม วิตามินบี 1 0.57 มิลลิกรัม วิตามินบี 2 0.03 มิลลิกรัม แคลเซียม 30.4 มิลลิกรัม และเหล็ก 3.56 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ผลการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ค่า L^* อยู่ในช่วง 23.43-45.81 ค่า a^* มีค่าระหว่าง 12.73-15.94 และค่า b^* ระหว่าง 20.93-32.17 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสีที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิและเวลาของการเก็บรักษาที่นานขึ้น ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าระหว่าง 1.54-1.91 Kg/mm² ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิของการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (Table 4)

ค่า water activity (a_w) ของผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบในระหว่างการเก็บรักษามีค่าเท่ากับ 0.028-0.381 (Table 4) ซึ่งมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เป็นระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้และเป็นระดับที่จุลินทรีย์หยุดการสร้างสรรค์พิษตลอดจนถึงการช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราในผลิตภัณฑ์ (Igo & Schaffner, 2021)

ค่า Thiobarbituric acid-reactive substance (TBARs) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามระยะเวลาการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงของค่า TBARs ในระหว่างการเก็บรักษาเกิดขึ้นจากกลุ่มคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำปฏิกิริยากับกรดไทโอบาร์บิทริก (Thiobarbituric acid) มีผลทำให้ค่า TBARs เพิ่มขึ้น ผลการวัดค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าในสัปดาห์ที่ 0 ของการเก็บรักษามีค่าเท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมมาลอน อัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม เป็น 0.40 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม ในสภาวะของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (Table 4) การเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ค่า TBARs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่อัตรา (k) เท่ากับ 0.015 0.016 และ 0.021 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมต่อสัปดาห์ ตามลำดับ (Figure 3)

เมื่อนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบไปหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า k สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ Arrhenius โดยผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy, E_0) เท่ากับ 13.68 kJ/mol โดยมีค่า Q_{10} เท่ากับ 1.20 เมื่อทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า TBARs น้อยกว่า 3 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม โดยที่ค่า TBARs มากกว่า 3 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม บ่งชี้ให้เห็นว่าไขมันที่เป็นองค์ประกอบของอาหารเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้มีกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์ โดยปกติผู้บริโภคสามารถรับรู้กลิ่นหืนที่ค่า TBARs ระหว่าง 5-20 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์

ต่อกิโลกรัม (สุพรรณพันธ์ โลหะลักษณะเดช และนัฐฐาศา เชนทร์ภักดี, 2011) ผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษาเท่ากับ 20.5 และ 18.5 เดือน ตามลำดับ (Figure 4)

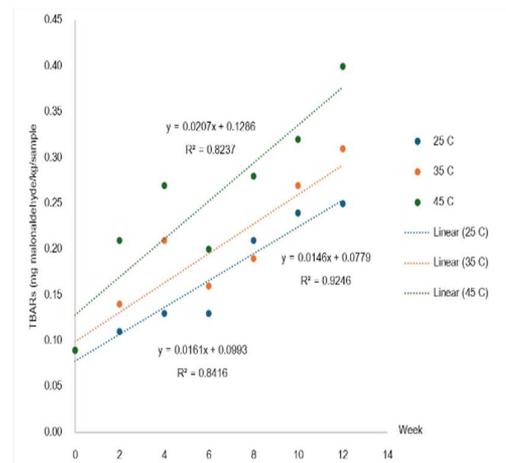


Figure 3 Change in TBARs of crispy pork stick product at 25 35 and 45 °C

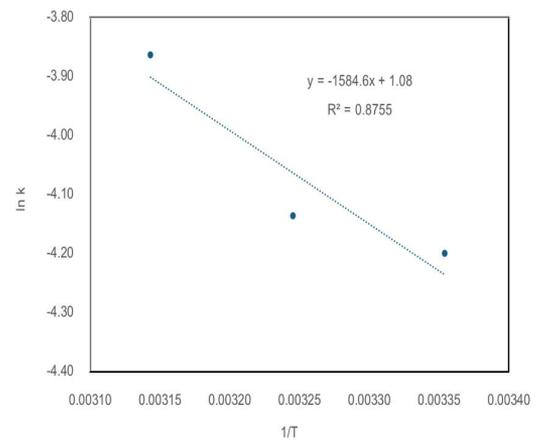


Figure 4 Relationship between $\ln k$ and $1/T$ of TBARs change in crispy pork stick product during storage

Table 4 Physical and chemical properties of crispy pork sticks product at 25, 35 and 45°C for 12 weeks

Quality	Temperature (°C)	Week			
		0	4	8	12
L*	25	39.55 ^c ±0.37	42.76 ^b ±0.51	42.90 ^b ±0.52	44.85 ^a ±1.75
	35	39.55 ^d ±0.37	45.81 ^a ±0.46	40.24 ^c ±0.47	45.36 ^b ±0.41
	45	39.55 ^c ±0.37	40.95 ^a ±0.48	39.81 ^b ±0.05	38.11 ^d ±0.31
a*	25	14.65 ^a ±0.11	13.83 ^c ±0.18	14.38 ^b ±0.04	13.64 ^c ±0.59
	35	14.65 ^a ±0.11	12.73 ^d ±0.07	14.45 ^b ±0.08	13.32 ^c ±0.04
	45	14.65 ^b ±0.11	14.99 ^a ±0.05	13.84 ^d ±0.08	13.99 ^c ±0.09
b*	25	25.20 ^c ±0.29	24.95 ^d ±0.06	26.98 ^b ±0.08	30.89 ^a ±0.60
	35	25.20 ^d ±0.29	25.81 ^b ±0.19	25.51 ^c ±0.46	32.17 ^a ±0.16
	45	25.20 ^b ±0.29	23.04 ^d ±0.11	24.28 ^c ±0.28	28.12 ^a ±0.09
a _w	25	0.38 ^a ±0.01	0.37 ^a ±0.06	0.32 ^b ±0.05	0.28 ^c ±0.01
	35	0.38 ^a ±0.01	0.37 ^a ±0.07	0.32 ^b ±0.02	0.28 ^c ±0.01
	45	0.38 ^a ±0.01	0.37 ^a ±0.04	0.32 ^b ±0.06	0.30 ^c ±0.01
TBARs (mg malonaldehyde/ kg sample)	25	0.09 ^c ±0.01	0.13 ^b ±0.01	0.21 ^a ±0.01	0.25 ^a ±0.02
	35	0.09 ^d ±0.01	0.21 ^b ±0.01	0.19 ^c ±0.01	0.31 ^a ±0.01
	45	0.09 ^c ±0.01	0.27 ^b ±0.01	0.28 ^b ±0.01	0.40 ^a ±0.01
Hardness (Kgf)	25	1.54 ^b ±0.02	-	1.55 ^b ±0.01	1.63 ^a ±0.03
	35	1.54 ^b ±0.02	-	1.58 ^b ±0.08	1.66 ^a ±0.04
	45	1.54 ^c ±0.02	-	1.88 ^b ±0.07	1.90 ^a ±0.03

Data are presented as means ± standard error

Different superscript (a-d) means significantly different in the same row (p<0.05)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การออกแบบสภาวะที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับบริษัท ร็องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อคุณภาพทางด้านเคมี กายภาพ คือ การใช้เนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 0.18% ในด้านคุณค่าทางโภชนาการสารอาหารหลักของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี พลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม และไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคลเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัมและใยอาหาร 0.61 กรัม ตามลำดับ สำหรับอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 18.5 เดือน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ควรจัดเก็บผลิตภัณฑ์ให้พ้นแสงและความร้อน เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานโครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีด

ความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ณ บริษัท ร็องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด โดยดำเนินงานด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบซึ่งเป็นโจทย์วิจัยที่ทางผู้ประกอบการต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) อุทยานวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ที่สนับสนุนงบประมาณและส่งเสริมการปฏิบัติงานเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันในภาคการผลิตและบริการในสถานประกอบการ

เอกสารอ้างอิง

- นันทา เป็งเนตร์, วิภา ประพินอักษร และดร.ณิศา นาคเสวี. (2563). การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบเชิงพาณิชย์ [รายงานการวิจัย]. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.).
- นิธยา รัตนพานนท์. (2557). *เคมีอาหาร*. โอเอส พับลิชิ่ง เฮาส์. สุปรรพพันธ์ โลหะลักษณะเดช และนัฏฐา คเชนทร์ภักดี. (2011). การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแห้งอบกรอบรส. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง*, 5(2), 105–110.

- André, G., & Shai, B. (1997). Meat batters: Effect of chemical modification on protein recovery and functionality. *Food Research International*, 30(1), 5–11. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(95)00022-4)
- AOAC. (2000). *Official method of analysis of AOAC International* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.
- Asuming-Bediako, N., Jaspal, M. H., Hallett, K., Bayntun, J., Baker, A., & Sheard, P. R. (2014). Effects of replacing pork backfat with emulsified vegetable oil on fatty acid composition and quality of UK-style sausages. *Meat Science*, 96(1), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.06.031>
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Hurler, J., Engesland, A., Kermany, B. P., & Škalko-Basnet, N. (2012). Improved texture analysis for hydrogel characterization: Gel cohesiveness, adhesiveness, and hardness. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(1), 180–188. <https://doi.org/10.1002/app.35414>
- Igo, M. J., & Schaffner, D. W. (2021). Models for factors influencing pathogen survival in low water activity foods from literature data are highly significant but show large unexplained variance. *Food Microbiology*, 98, 103783.
- Julian, M., Li, B., Morris, A., & Martin, E. B. (2004). Generalized partial least squares regression based on the penalized minimum norm projection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 72(1), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.01.026>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied linear statistical models*. Irwin.
- Minyi, H., & Hanne, C. B. (2017). Designing healthier comminuted meat products: Effect of dietary fibers on water distribution and texture of a fat-reduced meat model system. *Meat Science*, 133, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.07.001>
- Monika, G., Valerie, S., & Jochen, W. (2015). Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Food Hydrocolloids*, 45, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.021>
- Petracci, M., Bianchi, M., Mudalal, S., & Cavani, C. (2013). Functional ingredients for poultry meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 33(1), 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.004>
- Wenjiao, F., Yongkui, Z., Yunchuan, C., Junxiu, S., & Yuwen, Y. (2013). TBARS predictive models of pork sausages stored at different temperatures. *Meat Science*, 96(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.06>

ความชุกและความหลากหลายของ *Wolbachia* ในประชากรยุงธรรมชาติ (Diptera: Culicidae) จากภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย

Prevalence and diversity of *Wolbachia* in wild mosquito (Diptera: Culicidae) populations from the lower central Thailand

สรวิชัย จินแส¹, สุวิญา ประทุมราช², ภัคพล ท้าวเวชสุวรรณ² และ ภาณุพงษ์ ทองเปรม^{2*}

Sarunwich Cheensae¹, Suwitchaya Pratumrach², Pakkapol Thaowetsuwan² and Panupong Thongprem^{2*}

Received: 23 October 2024 ; Revised: 20 January 2025 ; Accepted: 26 February 2025

บทคัดย่อ

ยุงเป็นแมลงที่มีความสำคัญทางการแพทย์โดยจัดเป็นแมลงพาหะของโรคสำคัญหลายชนิด จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ายุงมีแบคทีเรียร่วมอาศัยเช่น *Wolbachia* อาศัยอยู่ในเซลล์ของยุง แบคทีเรียร่วมอาศัยเหล่านี้มีผลต่อการดำรงชีวิต หรือแม้แต่กระบวนการวิวัฒนาการของยุงชนิดต่าง ๆ ด้วยการที่มนุษย์จึงเลือกใช้ *Wolbachia* ในการควบคุมประชากรยุงเพื่อลดการแพร่ระบาดของเชื้อโรคที่มียุงเป็นพาหะได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการติดเชื้อแบคทีเรียร่วมอาศัยในกลุ่ม *Wolbachia* ในยุงที่พบในประเทศไทยนั้นมียุงน้อยมาก การศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการสำรวจความชุกชุมและความหลากหลายของ *Wolbachia* ในประชากรยุงที่อาศัยอยู่บางบริเวณของพื้นที่ภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย จากการเก็บตัวอย่างยุงทั้งหมด 144 ตัว พบยุงทั้งหมด 4 สกุล 6 ชนิด ได้แก่ *Aedes* sp., *Ae. albopictus*, *Anopheles* sp., *Culex* sp., *Cx. quinquefasciatus* และ *Udaya argyrurus* โดยพบการติดเชื้อ *Wolbachia* ในยุง 3 ชนิด จากวิธี PCR ได้แก่ *Ae. albopictus*, *Culex* sp. และ *Cx. quinquefasciatus* จากการศึกษา phylogenetic tree ของยีนตำแหน่ง 16S rRNA ของ *Wolbachia* พบว่าทั้งหมดถูกจัดอยู่ใน supergroup B และมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของยุง องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับวิวัฒนาการของยุงที่ได้รับอิทธิพลจาก *Wolbachia* และยิ่งช่วยให้มนุษย์สามารถรับมือกับแมลงที่เป็นพาหะเหล่านี้ได้ดีอีกด้วย

คำสำคัญ: *Wolbachia*, แบคทีเรียร่วมอาศัย, วิวัฒนาการ, แมลง, ยุง

Abstract

Mosquitoes are medically important insects, recognized as vectors for many serious diseases. Previous studies have shown that mosquitoes often harbor endosymbiotic bacteria, such as *Wolbachia*, within their cells. These endosymbiotic bacteria play vital roles in mosquito biology, including the evolution of various mosquito species. Consequently, humans have utilized *Wolbachia* to control mosquito populations, thereby reducing the spread of mosquito-borne diseases. However, data regarding the prevalence of *Wolbachia* symbiosis in mosquito populations in Thailand remains limited. This study aimed to investigate the prevalence and diversity of *Wolbachia* in mosquito populations inhabiting the lower central region of Thailand. A total of 144 mosquito samples were collected and identified as belonging to four genera and six species: *Aedes* sp., *Ae. albopictus*, *Anopheles* sp., *Culex* sp., *Cx. quinquefasciatus*, and *Udaya argyrurus*.

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

² หน่วยวิจัยด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

¹ Department of Biology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok, 10330

² Biodiversity Research Unit, Department of Biology, Faculty of Science, Silpakorn University Sanamchandra Palace Campus, Phraphathom Chedi, Maeung, Nakhon Pathom, 73000

* Corresponding author, e-mail: thongprem_p@su.ac.th

Three mosquito species tested positive for *Wolbachia* using PCR assays: *Ae. albopictus*, *Culex* sp., and *Cx. quinquefasciatus*. Phylogenetic analysis of the *Wolbachia* 16S rRNA gene revealed that all strains belonged to supergroup B, with diversity varying among mosquito species. The findings of this research contribute to a better understanding of mosquito evolution influenced by *Wolbachia*. Furthermore, this knowledge provides a basis for the effective control of these insect vectors.

Keywords: *Wolbachia*, endosymbionts, evolution, insects, mosquitoes

บทนำ

ยุงจัดอยู่ในอันดับ Diptera วงศ์ Culicidae เป็นแมลงปรสิตภายนอกกินเลือดของคนและสัตว์มีกระดูกสันหลังเป็นอาหารพบได้ในทุกพื้นที่ทั่วโลกยกเว้นในทวีปแอนตาร์กติกา ยุงเป็นแมลงที่มีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดต่อการดำรงชีวิตของผู้นบนโลกอย่างมาก เนื่องจากเป็นพาหะนำโรค (vector) ของโรคติดต่อสำคัญหลายชนิดที่ทำให้ผู้คนเจ็บป่วยล้มตายจำนวนมาก เช่น มาลาเรีย (malaria) ที่มียุงก้นปล่อง (*Anopheles* spp.) เป็นพาหะ โรคไข้เลือดออกเด็งกี (dengue hemorrhagic fever) และโรคชิคุนกุนยา (chikungunya) ที่มียุงลาย (*Aedes* spp.) เป็นพาหะ หรือโรคที่ทำให้เกิดความผิดปกติทางร่างกายอย่างโรคเท้าช้าง (elephantiasis) ที่มีแมลงพาหะเป็นยุงลาย ยุงเสือ (*Mansonia* spp.) และยุงรำคาญ (*Culex* spp.) เป็นต้น (Thongwat, 2017) จากการศึกษาในปัจจุบันพบยุงมากกว่า 3,500 ชนิด (Rattanarithikul *et al.*, 2005; Thongwat, 2017) และยุงที่สามารถพบได้ในประเทศไทยก็มีมากถึงประมาณ 450 ชนิด ใน 54 สกุล (Rattanarithikul *et al.*, 2005) การแพร่กระจายของยุงในเขตพื้นที่ต่าง ๆ ส่งผลให้รูปแบบการดำรงชีวิตและการสืบพันธุ์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดวิวัฒนาการของยุง การมีแบคทีเรียร่วมอาศัย (endosymbiont) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการกำหนดรูปแบบวิวัฒนาการของยุงเช่นกัน (Rasgon *et al.*, 2006)

ประชากรของยุงส่วนใหญ่ถูกพบว่ามีแบคทีเรียร่วมอาศัยอยู่ร่วมมากถึงประมาณ 44% (Ding *et al.*, 2020) โดยส่วนมากพบว่าเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม proteobacteria เช่น *Wolbachia* แบคทีเรียเหล่านี้มีบทบาทต่อชีววิทยาของยุงในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ส่งผลต่อรูปแบบการสืบพันธุ์ โดยอาจเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการเข้ากันไม่ได้ของ cytoplasm ที่เรียกว่า 'Cytoplasmic Incompatibility (CI)' (Zabalou *et al.*, 2004) ทำให้เกิด viral interference ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของยุงที่ติดเชื้อไวรัสและกลายเป็นพาหะนำโรคลดลง (Moreira *et al.*, 2009a) หรืออาจส่งผลต่อการปรับตัว (fitness) ของยุง เช่น ช่วยสังเคราะห์วิตามิน B ซึ่งเป็นสารอาหารที่พบได้ต่ำในแมลงที่กินเลือดเป็นอาหาร (Rio *et al.*, 2016) หรือส่งผลเสียต่อสรีรวิทยาของยุง เช่น ลดความแข็งแรงของ proboscis ของ

ยุง ทำให้ยุงไม่สามารถดูดเลือดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Moreira *et al.*, 2009b) การกระตุ้นให้เมตาบอลิซึมของยุงเพิ่มขึ้นส่งผลให้อายุขัยของยุงสั้นลง ตลอดจนการรบกวนความสามารถในการเจริญพันธุ์ การเจริญของเอ็มบริโอ และอัตราการฟักของไข่ยุง (Calvitti *et al.*, 2010; Suh *et al.*, 2009) การศึกษาเหล่านี้ทำให้ทราบถึงการกระจายของ *Wolbachia* กลุ่มต่าง ๆ ในประชากรยุงในธรรมชาติ หากยุงมี *Wolbachia* ในสายพันธุ์ต่างกัน ก็อาจส่งผลกระทบต่อชีววิทยาของยุงได้แตกต่างกัน ถึงอย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการแพร่กระจายของ *Wolbachia* ในประชากรยุงในธรรมชาติและการศึกษาความหลากหลายของ *Wolbachia* ในยุงที่พบในประเทศไทยยังคงมีอยู่น้อย ความเข้าใจในวิวัฒนาการของยุงที่อยู่ร่วมกับแบคทีเรียร่วมอาศัยเหล่านี้ จะเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่สำคัญที่จะทำให้มนุษย์สามารถควบคุมหรือจัดการการเกิดโรคระบาดที่มาจากยุงได้

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรากฏของ *Wolbachia* ในประชากรยุงที่อาจพบได้ในบางบริเวณของพื้นที่ภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย โดยตรวจหา *Wolbachia* ด้วยวิธี PCR ที่ใช้ DNA primers ที่จำเพาะกับ *Wolbachia* ศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมและความสัมพันธ์ของ *Wolbachia* กลุ่มต่าง ๆ ในแง่ของวิวัฒนาการ ซึ่งอาจใช้ในการประเมินผลกระทบของ *Wolbachia* ต่อชีววิทยาของยุงบางชนิดได้

การทดลอง

วิธีการเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างยุงที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวอย่างยุงที่ถูกเก็บสะสมมาจากพื้นที่เกษตรกรรม บ่อน้ำขนาดเล็ก ในจังหวัดนครปฐม พื้นที่อำเภอบางเลน อำเภอเมืองนครปฐม และในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี ในช่วงปี 2565-2566 ตัวอย่างยุงถูกสำรวจด้วยวิธีใช้สวิงจับปลาสุ่มตักลงไปแหล่งน้ำขังที่มีลักษณะเหมาะสมต่อการอาศัยของลูกน้ำยุง โดยดัดแปลงจากการศึกษาจาก Brisco *et al.* (2016) ตัวเต็มวัยสำรวจด้วยกับดักแสงไฟ (UV-C light trap) ดัดแปลงจากการศึกษาของ Silva *et al.* (2019) โดยผสมน้ำยาล้างจาน :

น้ำเปล่า ในอัตราส่วน 1 : 40 ตั้งกับดักเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนจะนำตัวอย่างแมลงที่ได้ใส่ลงในหลอดเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ใช้สวิงจับแมลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากสวิง 36 cm ต่อมสวิงยาว 1.5 m สุ่มโฉบตามยอดหญ้าตามพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำ

ตัวอย่างแมลงทั้งในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัย จะถูกเก็บใน 95% ethanol ทั้งหมด และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -4°C ก่อนนำมาตรวจสอบชนิดด้วยการจำแนกจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาในเบื้องต้น โดยอาศัยคู่มือการจัดจำแนกของ Rattanarithikul *et al.* (2005) และ World Health Organization. Regional Office for South-East (2020) จากนั้นจะนำไปสกัด genomics DNA ทั้งนี้ชนิดของยุงจะถูกยืนยันด้วยวิธี DNA barcoding อีกครั้ง

การสกัด genomics DNA

สกัด DNA แยกยุงแต่ละตัว โดยใช้ยุง 10-20 ตัว ต่อชนิด (ยุงตัวเต็มวัย 10 ตัว ตัวอ่อน 10 ตัว) ขึ้นอยู่กับจำนวนของยุงที่สำรวจได้ จากนั้นจะนำยุงมาสกัด DNA ด้วยวิธี SDS-EB protocol ดัดแปลงจากการศึกษาของ Asghar *et al.* (2015) กล่าวโดยย่อคือ

ใส่ยุงที่ล้างสะอาดและทำให้แห้งแล้วลงในหลอด microcentrifuge ขนาด 1.5 mL 1 ตัว/หลอด เติมน้ำ 150 μ L SDS-EB (1M Tris- HCl pH 8.0, 0.5M EDTA pH 8.0, 5M NaCl, 10% SDS, double-distilled water) ลงไปในหลอดให้ท่วมตัวอย่างยุง บดยุงให้ละเอียดด้วย micro-pestle ก่อนจะ vortex สารเข้าด้วยกัน นำไปบ่ม 35°C นาน 10 นาที จากนั้นจึงเติม isoamyl alcohol : chloroform (1 : 24) ปริมาตร 250 μ L ลงไปในหลอด นำไป vortex และปั่นเหวี่ยงที่ 14000 rpm นาน 5 นาที เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนดังกล่าว จะเห็นสารละลายแยกชั้นออกจากกันอย่างชัดเจน ให้ถ่ายสารละลาย

ส่วนใสปริมาตร 100 μ L ลงใน microcentrifuge tube ขนาด 1.5 mL หลอดใหม่ พร้อมกับเติม 200 μ L isopropanol แล้วพลิกหลอดไปมาให้เข้ากันอย่างเบา มือ นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 14000 rpm นาน 4 นาที ในขั้นตอนนี้จะเริ่มสังเกตเห็นตะกอนที่บริเวณก้นหลอด ให้เทสารละลายเหนือตะกอนทิ้ง ก่อนจะเติม 70% ethanol ปริมาตร 150 μ L นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 14000 rpm 4 นาที เทสารละลายเหนือตะกอนทิ้ง (ทำซ้ำ 2 ครั้ง) ทำให้ตะกอนแห้งด้วยการเปิดฝาดั้งทิ้งไว้ (air dry) จากนั้นละลายตะกอน genomics DNA ด้วย molecular water ปริมาตร 50 μ L เก็บตัวอย่าง DNA ที่สกัดได้ไว้ที่ -20°C จนกว่าจะถึงการศึกษาดำเนินไป

การตรวจหา *Wolbachia* ด้วยวิธี PCR

ตัวอย่าง DNA ของยุงแต่ละตัวจะถูกนำมาตรวจเช็คคุณภาพ DNA ด้วยการทำ PCR ของยีนตำแหน่ง *COI* ของยุง เพื่อให้มั่นใจว่า DNA ที่สกัดมีคุณภาพที่ดีเพียงพอสำหรับการตรวจหา endosymbiont (ตัวอย่าง PCR product ของยีน *COI* จะถูกส่งไปทำ DNA sequencing เพื่อนำมายืนยันชนิดของยุงด้วยวิธี DNA barcoding) จากนั้นจะสำรวจ *Wolbachia* โดยใช้ primers ที่เพิ่มจำนวนยีนในตำแหน่ง *16S rRNA* โดยมีลำดับเบสของ primers และ PCR conditions ดังแสดงใน Table 1 ซึ่ง primers W-Spec F/R นี้ได้เคยถูกใช้สำหรับการตรวจหา *Wolbachia* ในยุงมาแล้วจากการศึกษาก่อนหน้า (Gomes *et al.*, 2017; Sawasichai *et al.*, 2019) ตัวอย่าง DNA ที่ถูกใช้เป็น positive control คือตัวอย่าง DNA ของแมลงที่เคยตรวจสอบว่ามี *Wolbachia* และผ่านการทำ PCR มาแล้ว ส่วน negative control ใช้ molecular-graded H₂O ที่ไม่มี DNA ปนเปื้อน หลังจากนั้นตรวจสอบผลของ PCR ด้วยวิธี gel electrophoresis โดยใช้ 1% agarose

Table 1 List of PCR primers in this study. All the primers were used under the same PCR conditions, adapted from Thongprem *et al.* (2020). Initial denaturation step at 95°C for 5 min, 35 cycles of these following steps; denaturation at 94°C for 30 s, annealing at 52°C 30 s and extension at 72°C 50 s, finally, the final extension was run at 72°C for 7 min.

Target gene	Primer name	Primer sequence (5'-3')	Product size (bp)	References
Mosquito (Diptera: Culicidae)	LCO_1490	GGT CAA CAA ATC ATA AAG ATA TTG G	710	Folmer <i>et al.</i> (1994)
<i>COI</i> gene	HCO_2198	TAA ACT TCA GGG TGA CCA AAA AAT CA		
<i>Wolbachia</i>	W-Spec F	CAT ACC TAT TCG AAG GGA TAG	438	Werren and Windsor (2000)
<i>16S rRNA</i> gene:	W-Spec R	AGC TTC GAG TGA AAC CAA TTC		

การศึกษาความหลากหลายของ *Wolbachia* ด้วยวิธี Phylogenetic tree

หลังจากตรวจสอบการติดเชื้อ *Wolbachia* ด้วยเทคนิค PCR เรียบร้อยแล้ว จะนำตัวอย่างที่ให้ผล positive กับการทดสอบไปส่งตรวจลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยวิธีการ Barcode-Tagged Sequencing (BT-SeqTM) เมื่อได้ DNA sequence ของ *Wolbachia* แล้ว จะนำมา blast กับฐานข้อมูล NCBI และดึงข้อมูลของ *Wolbachia* ในสายพันธุ์ที่ใกล้เคียงมาร่วมวิเคราะห์ เมื่อได้ sequence ที่ต้องการทั้งหมดแล้วจึงทำ multiple alignment ด้วยวิธี muscle alignment (Edgar, 2004) ใน MEGA XI (Tamura *et al.*, 2021) จากนั้นตรวจสอบโมเดลที่เหมาะสมและสร้าง Phylogenetic tree เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ด้วยวิธี Maximum likelihood ด้วยค่า bootstrap 1,000 ครั้ง โดยใช้ IQ-tree จาก CIPRES (Minh *et al.*, 2020) และตรวจสอบภาพ phylogenetic tree ด้วย FigTree version 1.4.4 ลำดับเบสบน DNA sequence ของ *Wolbachia* ที่พบในการศึกษานี้ได้ลงทะเบียนในฐานข้อมูล GenBank ภายใต้หมายเลข accession number PQ470917-PQ470924

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการศึกษาตัวอย่างยุงจำนวน 144 ตัว จำแนกได้เป็น 2 วงศ์ย่อย ได้แก่ Subfamily Anophelinae และ

Subfamily Culicinae ซึ่งจำแนกได้ทั้งหมด 4 สกุล 6 ชนิด โดยการสำรวจพบทั้งยุงในระยะตัวอ่อนจำนวน 98 ตัว และ ตัวเต็มวัยจำนวน 46 ตัว โดยส่วนมากยุงที่พบในระยะตัวเต็มวัยสำรวจได้จากการใช้กับดักแสงไฟ โดยในการศึกษานี้สำรวจพบตัวเต็มวัยของ *Anopheles* sp. มากที่สุดในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี และชนิดที่พบตัวอ่อนยุงมากที่สุดคือ *Udaya argyrurus* โดยพบได้ทั้งในพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม และ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี (Table 2) ยุงที่สำรวจพบส่วนใหญ่จัดเป็นยุงที่มีความสำคัญทางการแพทย์ และสามารถพบการแพร่กระจายพันธุ์ได้มากในเขตร้อน (Thongwat, 2017) เช่น ยุงลาย *Aedes* sp. ซึ่งเป็นพาหะนำโรคไข้เลือดออก โรคไข้เหลือง โรคชิคุนกุนยา และโรคไข้ซิกา โรคเหล่านี้จัดเป็นโรคระบาดร้ายแรงที่เกิดจากการติดเชื้อไวรัส (Thongwat, 2017) ยุงรำคาญ *Culex* sp. มีรายงานเป็นพาหะนำโรคเท้าช้าง ซึ่งเกิดจากการได้รับพยาธิตัวกลมฟีลาเรีย (Thongwat, 2017) ยุงก้นปล่อง *Anopheles* sp. เป็นพาหะนำโรคไข้มาลาเรีย เกิดจากการได้รับเชื้อ *Plasmodium* sp. (Thongwat, 2017) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่ายุงเหล่านี้สามารถเป็นโฮสต์ให้กับแบคทีเรียร่วมอาศัยได้อีกหลายชนิด เช่น *Spiroplasma*, *Rickettsia* และ *Wolbachia* เป็นต้น (Pilgrim *et al.*, 2021; Shimooka *et al.*, 2021; Sicard *et al.*, 2019)

Table 2 *Wolbachia* screening from PCR assays. Number of positive individuals are before the brackets. Location indicates in abbreviation letters; BL = Bang Lane, Nakhon Pathom, PT = Mueang, Nakhon Pathom, PB = Mueang Petchaburi.

Mosquito species	Location	Number positive (Number tested)
<u>Subfamily Anophelinae</u>		
1 <i>Anopheles</i> sp.	PB	0 (38)
<u>Subfamily Culicinae</u>		
2 <i>Aedes</i> sp.	BL, PB	0 (26)
3 <i>Ae. albopictus</i>	PT, PB	4 (4)
4 <i>Culex</i> sp.	PT, BL	1 (9)
5 <i>Cx. quinquefasciatus</i>	PT	3 (13)
6 <i>Udaya argyrurus</i>	BL, PB	0 (54)
Total		8 (144)

จากการตรวจสอบ *Wolbachia* ด้วยวิธี PCR พบยุงที่ให้ผล positive 3 ชนิด ได้แก่ *Aedes albopictus*, *Culex* sp. และ *Cx. quinquefasciatus* (Table 2) โดยยุง *Ae. albopictus* ติดเชื้อที่มีความถี่สูงสุด 100% และยุงที่พบอัตราการติดเชื้อต่ำที่สุดคือ ยุง *Culex* sp. มีอัตราการติดเชื้อที่ 11.1% ดังแสดง

ใน Table 3 ความถี่ในการติดเชื้อเหล่านี้อาจสะท้อนถึงความแข็งแกร่งของการเกิด co-evolution ของยุงกับ *Wolbachia* ซึ่งความถี่ในการติดเชื้อที่น้อยอาจเป็นข้อบ่งชี้ว่า แบคทีเรียร่วมอาศัยเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลดีต่อ fitness ของแมลงที่เป็นโฮสต์มากนัก (McCutcheon *et al.*, 2019) มีโอกาสเป็นไปได้ว่า

Wolbachia อาจมีบทบาทเป็นปรสิตทางการสืบพันธุ์ (reproductive parasite) ของยุงได้ (Adams *et al.*, 2021; Sicard *et al.*, 2019) ถึงอย่างไรก็ตามความถี่ในการติดเชื้อ *Wolbachia* ของ *Ae. albopictus* ที่มีค่าสูงยังเป็นการศึกษาจาก

ตัวอย่างยุงเพียง 4 ตัวเท่านั้น ทั้งนี้หากมีการศึกษาในประชากรยุงที่มากขึ้นหรือเก็บตัวอย่างยุงหลายกลุ่มประชากร อาจทำให้เข้าใจความถี่ในการติดเชื้อของ *Wolbachia* ในยุงแต่ละชนิดได้ดียิ่งขึ้น

Table 3 Prevalence of *Wolbachia* in positive samples from PCR assays.

Mosquito species	Number tested		Number Infected		% Infection
	Juvenile	Adults	Juvenile	Adults	
1 <i>Aedes albopictus</i>	0	4	-	4	100%
2 <i>Culex</i> sp.	0	9	-	1	11.1%
3 <i>Cx. quinquefasciatus</i>	12	1	2	1	23.1%

ความหลากหลายของ *Wolbachia* และความสัมพันธ์ในเชิงวิวัฒนาการกับ *Wolbachia* สายพันธุ์อื่นที่ blast ได้จากฐานข้อมูล NCBI พบว่า *Wolbachia* จากการศึกษานี้จัดอยู่ใน Supergroup B ทั้งหมด โดย *Wolbachia* ที่พบในยุง *Ae. albopictus* จากเพชรบุรี และอำเภอเมืองนครปฐม มี haplotype แบบเดียวกัน ส่วน *Wolbachia* ที่พบในลูกน้ำยุง *Cx. quinquefasciatus* จากอำเภอบางเลนจังหวัดนครปฐมกลับพบ

variation ที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ถึงอย่างไรก็ตาม *Wolbachia* ที่พบทั้งในยุงสกุล *Aedes* และ *Culex* ถูกจัดเป็น sister group กันดังแสดงใน Phylogenetic tree (Figure 1)

Wolbachia ที่มีการตรวจพบทั้งหมดในยุงทั้ง 2 สกุล จัดอยู่ใน Supergroup B ซึ่งเป็นกลุ่มของ *Wolbachia* ที่มักมีบทบาทในแง่ของการเป็นปรสิตทางการสืบพันธุ์ของแมลงและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง

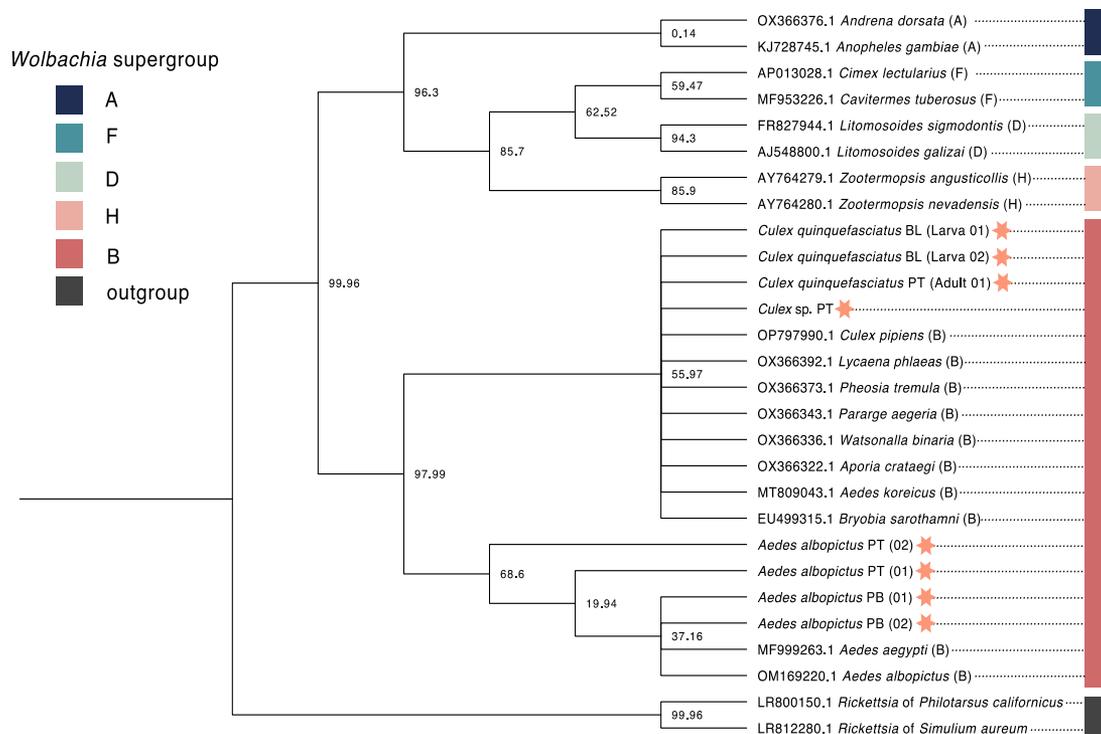


Figure 1 Phylogenetic tree analysis of *Wolbachia* based on 16S rRNA gene sequences from mosquitoes in this study (marked with orange stars), combining related *Wolbachia* strains as reference supergroups obtained from NCBI database. GenBank accession numbers and the host species are at the end of the branches. The topology was constructed by K2+G model in IQ-tree from CIPRES with Maximum Likelihood method. Visualisation of the phylogenetic tree was conducted in FigTree version 1.4.4. Number at the nodes represent bootstrap values from 1,000 sampling events.

ชนิดต่าง ๆ (Adams *et al.*, 2021; Ant *et al.*, 2020) โดย *Wolbachia* เหล่านี้ได้มีรายงานพบในแมลงหลายชนิด ทั้งแมลงในอันดับ Lepidoptera เช่น ผีเสื้อกลางคืน swallow prominent (*Pheosia tremula*) oak hook-tip (*Watsonalla binaria*) ผีเสื้อกลางคืน speckled wood (*Pararge aegeria*) ดังปรากฏใน Figure 1 นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของแมลงอันดับ Hymenoptera เช่น แตนเบียน (*Nasonia vitripennis*) และอันดับ Hemiptera เช่น แมลงหรีขาว whitefly (*Bemisia tabaci*) ที่รายงานพบจากการศึกษาก่อนหน้าเป็นต้น (Bordenstein & Werren, 2000; Li *et al.*, 2017)

ถึงแม้การศึกษาจะยังไม่พบยุงชนิดใหม่ที่ติดเชื้อ *Wolbachia* แต่ผลจากการศึกษานี้ก็เป็นหลักฐานชิ้นสำคัญที่ยืนยันการแพร่กระจายของ *Wolbachia* ทั้งในประชากรยุง *Ae. albopictus* และ *Cx. quinquefasciatus* ในพื้นที่ภาคกลางตอนล่างของไทย ก่อนหน้านี้การศึกษาในประเทศมาเลเซียเคยรายงานการพบ *Wolbachia* ในยุง *Ae. albopictus* ที่อาจมีผลต่อการแพร่กระจายของไวรัสชิคุนกุนยา (Ahmad *et al.*, 2017) และจากการศึกษาของ Ant *et al.* (2020) ยังพบ *Wolbachia* ใน *Cx. quinquefasciatus* ซึ่งมีผลต่อการเกิด CI ในประชากรของยุง โดยการเกิด CI นี้จะส่งผลต่อการลดจำนวนประชากรของยุงอย่างมากและอาจเหนี่ยวนำให้ยุงมีโอกาสเกิดการลดลงของความหลากหลายทางพันธุกรรม ซึ่งเป็นผลกระทบเชิงลบในแง่ของวิวัฒนาการ ดังนั้นการพบ *Wolbachia* ในยุง *Ae. albopictus* และ *Cx. quinquefasciatus* ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม และจังหวัดเพชรบุรีอาจแสดงถึงแนวโน้มการลดลงของประชากรยุงเหล่านี้ หากการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตมีการวางแผนเก็บตัวอย่างยุงอย่างเป็นระบบ และศึกษาการติดเชื้อ *Wolbachia* ในประชากรยุงอย่างต่อเนื่อง อาจจะช่วยทำให้เข้าใจการแพร่กระจายของ *Wolbachia* ที่ส่งผลต่อการสืบพันธุ์ของยุง ซึ่งองค์ความรู้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมการแพร่ระบาดของยุงได้

สรุป

การศึกษากการแพร่กระจายของ *Wolbachia* ในประชากรยุงที่สำรวจจากอำเภอเมืองจังหวัดเพชรบุรี อำเภอบางเลน และอำเภอเมืองจังหวัดนครปฐม พบยุง 144 ตัว จำแนกเป็น 4 สกุล 6 ชนิด ได้แก่ *Aedes* sp., *Ae. albopictus*, *Anopheles* sp., *Culex* sp., *Cx. quinquefasciatus* และ *Udaya argyrurus* โดยพบการติดเชื้อ *Wolbachia* ในยุง 3 ชนิด จากการตรวจหาด้วยวิธี PCR ได้แก่ *Ae. albopictus*, *Culex* sp. และ *Cx. quinquefasciatus* จากการศึกษาด้าน phylogenetic tree ของยีนตำแหน่ง 16S rRNA ของ *Wolbachia* พบว่า

ทั้งหมดถูกจัดอยู่ใน supergroup B และมีความหลากหลายแตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ก่อนหน้านี้คาดว่า *Wolbachia* ที่พบในการศึกษานี้อาจมีบทบาทในแง่ของการเป็นปรสิตรักษาการสืบพันธุ์ของยุง เช่น อาจเหนี่ยวนำให้เกิดความเข้ากันไม่ได้ของไซโทพลาสซึม (cytoplasmic incompatibility) และอาจทำให้เกิดการลดลงของประชากรยุงถึงอย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังคงเป็นหลักฐานชิ้นสำคัญที่ช่วยให้เห็นถึงการแพร่กระจายพันธุ์ของ *Wolbachia* ในยุงบางประชากรในประเทศไทย และควรให้มีการศึกษาเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการควบคุมการแพร่พันธุ์ของยุงได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับอาจารย์หลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก จากกองทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สัญญาทุนเลขที่ SRIF-PRG-2567-07

จริยธรรมการใช้สัตว์ทดลอง

การเก็บตัวอย่างแมลงเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้ได้ผ่านการขออนุญาตการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ จากคณะกรรมการกำกับดูแลการเลี้ยงและใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (คกศ. มศก.) โครงการเลขที่ 14/2565 ขออนุญาตการใช้สัตว์ เลขที่ U1-09605-2564

เอกสารอ้างอิง

- Adams, K. L., Abernathy, D. G., Willett, B. C., Selland, E. K., Itoe, M. A., & Catteruccia, F. (2021). *Wolbachia cifB* induces cytoplasmic incompatibility in the malaria mosquito vector. *Nature Microbiology*, 6(12), 1575–1582. <https://doi.org/10.1038/s41564-021-00998-6>
- Ahmad, N. A., Vythilingam, I., Lim, Y. A. L., Zabari, N., & Lee, H. L. (2017). Detection of *Wolbachia* in *Aedes albopictus* and their effects on Chikungunya virus. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 96(1), 148–156. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.16-0516>
- Ant, T. H., Herd, C., Louis, F., Failloux, A. B., & Sinkins, S. P. (2020). *Wolbachia* transinfections in *Culex quinquefasciatus* generate cytoplasmic incompatibility. *Insect Molecular Biology*, 29(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/imb.12604>

- Asghar, U., Malik, M. F., Anwar, F., Javed, A., & Raza, A. (2015). DNA extraction from insects by using different techniques: A review. *Advances in Entomology*, 3, 132–138.
- Bordenstein, S. R., & Werren, J. H. (2000). Do *Wolbachia* influence fecundity in *Nasonia vitripennis*? *Heredity*, 84(1), 54–62. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2000.00637.x>
- Brisco, K. K., Cornel, A. J., Lee, Y., Mouatcho, J., & Braack, L. (2016). Comparing efficacy of a sweep net and a dip method for collection of mosquito larvae in large bodies of water in South Africa. *F1000 Research*, 5, 713. <https://doi.org/10.12688/f1000research.8351.1>
- Calvitti, M., Moretti, R., Lampazzi, E., Bellini, R., & Dobson, S. L. (2010). Characterization of a new *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae)-*Wolbachia pipientis* (Rickettsiales: Rickettsiaceae) symbiotic association generated by artificial transfer of the wPip strain from *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 47(2), 179–187. <https://doi.org/10.1603/me09140>
- Ding, H., Yeo, H., & Puniamoorthy, N. (2020). *Wolbachia* infection in wild mosquitoes (Diptera: Culicidae): Implications for transmission modes and host-endosymbiont associations in Singapore. *Parasites & Vectors*, 13(1), 612. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04466-8>
- Edgar, R. C. (2004). MUSCLE: Multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research*, 32(5), 1792–1797. <https://doi.org/10.1093/nar/gkh340>
- Folmer, O., Black, M., Hoeh, W., Lutz, R., & Vrijenhoek, R. (1994). DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology and Biotechnology*, 3(5), 294–299.
- Gomes, F. M., Hixson, B. L., Tyner, M. D. W., Ramirez, J. L., Canepa, G. E., Alves e Silva, T. L., Molina-Cruz, A., Keita, M., Kane, F., Traoré, B., Sogoba, N., & Barillas-Mury, C. (2017). Effect of naturally occurring *Wolbachia* in *Anopheles gambiae* s.l. mosquitoes from Mali on *Plasmodium falciparum* malaria transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(47), 12566–12571. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716181114>
- Li, S.-J., Ahmed, M. Z., Lv, N., Shi, P.-Q., Wang, X.-M., Huang, J.-L., & Qiu, B.-L. (2017). Plant-mediated horizontal transmission of *Wolbachia* between whiteflies. *The ISME Journal*, 11(4), 1019–1028. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.164>
- McCutcheon, J. P., Boyd, B. M., & Dale, C. (2019). The life of an insect endosymbiont from the cradle to the grave. *Current Biology*, 29(11), R485–R495. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.03.032>
- Minh, B. Q., Schmidt, H. A., Chernomor, O., Schrempf, D., Woodhams, M. D., von Haeseler, A., & Lanfear, R. (2020). IQ-TREE 2: New models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. *Molecular Biology and Evolution*, 37(5), 1530–1534. <https://doi.org/10.1093/molbev/msaa015>
- Moreira, L. A., Iturbe-Ormaetxe, I., Jeffery, J. A., Lu, G., Pyke, A. T., Hedges, L. M., Rocha, B. C., Hall-Mendelin, S., Day, A., Riegler, M., Hugo, L. E., Johnson, K. N., Kay, B. H., McGraw, E. A., van den Hurk, A. F., Ryan, P. A., & O'Neill, S. L. (2009a). A *Wolbachia* symbiont in *Aedes aegypti* limits infection with dengue, Chikungunya, and *Plasmodium*. *Cell*, 139(7), 1268–1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.11.042>
- Moreira, L. A., Saig, E., Turley, A. P., Ribeiro, J. M. C., O'Neill, S. L., & McGraw, E. A. (2009b). Human probing behavior of *Aedes aegypti* when infected with a life-shortening strain of *Wolbachia*. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 3(12), e568. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0000568>
- Pilgrim, J., Thongpreem, P., Davison, H. R., Siozios, S., Baylis, M., Zakharov, E. V., Ratnasingham, S., deWaard, J. R., Macadam, C. R., Smith, M. A., & Hurst, G. D. D. (2021). *Torix Rickettsia* are widespread in arthropods and reflect a neglected symbiosis. *GigaScience*, 10(3), giab021. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giab021>
- Rasgon, J. L., Cornel, A. J., & Scott, T. W. (2006). Evolutionary history of a mosquito endosymbiont

- revealed through mitochondrial hitchhiking. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1594), 1603–1611. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3493>
- Rattarithikul, R., Harrison, B. A., Panthusiri, P., & Coleman, R. E. (2005). Illustrated keys to the mosquitoes of Thailand I. Background; geographic distribution; lists of genera, subgenera, and species; and a key to the genera. *The Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, 36(Suppl 1), 1–80.
- Rio, R. V. M., Attardo, G. M., & Weiss, B. L. (2016). Grandeur alliances: Symbiont metabolic integration and obligate arthropod hematophagy. *Trends in Parasitology*, 32(9), 739–749. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2016.05.002>
- Sawasdichai, S., Chaumeau, V., Dah, T., Kulabkeeree, T., Kajeechiwa, L., Phanaphadungtham, M., Trakoolchengkaew, M., Kittiphanakun, P., Akararungrot, Y., Oo, K., Delmas, G., White, N. J., & Nosten, F. H. (2019). Detection of diverse *Wolbachia* 16S rRNA sequences at low titers from malaria vectors in Kayin state, Myanmar. *Wellcome Open Research*, 4, 11. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.15005.4>
- Shimooka, M., Sakurai, Y., Muramatsu, Y., & Uchida, L. (2021). Isolation and characterization of mosquito-associated *Spiroplasma cantharicola* from *Aedes japonicus* collected in Hokkaido, Japan. *Insects*, 12(12), 1056. <https://doi.org/10.3390/insects12121056>
- Sicard, M., Bonneau, M., & Weill, M. (2019). *Wolbachia* prevalence, diversity, and ability to induce cytoplasmic incompatibility in mosquitoes. *Current Opinion in Insect Science*, 34, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.02.005>
- Silva, F. S., Costa-Neta, B. M., de Sousa de Almeida, M., de Araújo, E. C., & Aguiar, J. V. C. (2019). Field performance of a low cost, simple-to-build, non-motorized light-emitting diode (LED) trap for capturing adult *Anopheles* mosquitoes (Diptera: Culicidae). *Acta Tropica*, 190, 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2018.10.014>
- Suh, E., Mercer, D. R., Fu, Y., & Dobson, S. L. (2009). Pathogenicity of life-shortening *Wolbachia* in *Aedes albopictus* after transfer from *Drosophila melanogaster*. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(24), 7783–7788. <https://doi.org/10.1128/AEM.01331-09>
- Tamura, K., Stecher, G., & Kumar, S. (2021). MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, 38(7), 3022–3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- Thongprem, P., Evison, S. E. F., Hurst, G. D. D., & Otti, O. (2020). Transmission, tropism, and biological impacts of *Torix Rickettsia* in the common bed bug *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). *Frontiers in Microbiology*, 11, 608763. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.608763>
- Werren, J. H., & Windsor, D. M. (2000). *Wolbachia* infection frequencies in insects: Evidence of a global equilibrium? *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 267(1450), 1277–1285. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1139>
- World Health Organization. Regional Office for South-East Asia. (2020). *Pictorial identification key of important disease vectors in the WHO South-East Asia Region*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/332202>
- Zabalou, S., Riegler, M., Theodorakopoulou, M., Stauffer, C., Savakis, C., & Bourtzis, K. (2004). *Wolbachia*-induced cytoplasmic incompatibility as a means for insect pest population control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(42), 15042–15045. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403853101>

ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของกระเทียมไทย

Effect of storage conditions on the stability of physical and chemical characteristics of Thai garlic

วันปิติ ธรรมศรี^{1*}, จามรี กลางคาร¹, จิตินาถ สุคนเขตร¹ และ จิตติพร ลิธิภูภา¹

Wanpiti Thammasri^{1*}, Chamaree Klangkan¹, Thitinat Sukonket¹ and Thitiporn Linitda¹

Received: 16 October 2024 ; Revised: 9 January 2025 ; Accepted: 6 March 2025

บทคัดย่อ

กระเทียมไทยในช่วงที่ผลผลิตออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมากมักส่งผลทำให้ราคากระเทียมตกต่ำซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของเกษตรกร หากสามารถยืดอายุหรือเก็บรักษาคุณภาพกระเทียมให้ยาวนานมากยิ่งขึ้นย่อมสร้างโอกาสทางการค้าให้กับเกษตรกรในการจำหน่ายกระเทียมเพื่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระเทียมดำที่สามารถเพิ่มรายได้อีกช่องทางหนึ่ง การศึกษาในครั้งนี้คณะผู้วิจัยจึงต้องการที่จะศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของกระเทียมไทย โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษากระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลาง จำนวน 24 ตัวอย่าง ภายใต้อุณหภูมิ 1 และ 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-30% และ 40-60% ที่ระยะเวลา 30 และ 60 วัน เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสาร S-allylcysteine คือ เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) ผลการศึกษา พบว่า สภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพของกระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลาง คือ ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 60 วัน โดยลักษณะเนื้อสัมผัสของกลีบกระเทียมมีความนิ่ม แต่ความมันวาวลดลงทั้งนี้ไม่ส่งผลให้กลีบกระเทียมแห้งหรือสูญเสียความชื้น ส่วนสภาวะการเก็บรักษาของกระเทียมทั้งสองชนิดต่อลักษณะทางเคมี ด้วยการทดสอบ Kruskal-Wallis Test พบว่า ที่ระยะเวลา 60 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% กระเทียมพันธุ์เบาให้ค่าเฉลี่ยของสาร SAC สูงสุด เท่ากับ 2.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างจากสภาวะอื่นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และกระเทียมพันธุ์ปานกลาง ให้ค่าเฉลี่ยสาร SAC สูงสุด เท่ากับ 0.98 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษานี้ทำให้พบว่าสภาวะการเก็บรักษากระเทียมสดสามารถทำให้ปริมาณสาร SAC ในกระเทียมเพิ่มขึ้นได้

คำสำคัญ: กระเทียมไทย, สภาวะการเก็บรักษา, สารเอส-อัลลิลซิสเทอีน

Abstract

Thai garlic production during periods of market excess will cause the price of garlic to fall, posing a major problem for farmers. If the quality of garlic can be preserved for a longer period, it will create a business opportunity for farmers to sell garlic for processing into black garlic products, which can increase their income in another way. In this study, the researchers aimed to investigate the effect of storage conditions on the stability of the physical and chemical characteristics of Thai garlic. The objective of this study was to find the optimum storage conditions for 24 samples of early-maturing garlic and medium-maturing garlic, at temperatures of 1 and 4 degrees Celsius and relative humidity of 10-30% and 40-60% for 30 and 60 days. High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) is the instrument used to study S-allylcysteine. The study found that the storage conditions of physical characteristics of early-maturing garlic and medium-maturing garlic: storage time of 60 days. The texture of garlic cloves is soft, but the shine is reduced. This does not cause the garlic cloves to become dry or lose moisture. The storage conditions of both garlic varieties

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพมหานคร 10700

¹ Faculty of Science and Technology Suan Dusit University, Bangkok, 10700

* Corresponding author, e-mail: twanpiti@gmail.com

on chemical characteristics by the Kruskal-Wallis Test found that at 60 days under 4 degrees Celsius and 40-60% relative humidity, the light garlic variety gave the highest average SAC content of 2.70 mg/g and was the most suitable condition, significantly different from other conditions at the level of 0.05. And which early- medium-maturing garlic gave the highest average value of S-allylcysteine (SAC), averaging 2.70 milligrams per gram. And medium-maturing garlic gave the highest average value of S-allylcysteine (SAC), averaging 0.98 milligrams per gram. The results of this study found that storage conditions of fresh garlic can increase SAC in garlic.

Keywords: Thai garlic, storage conditions, S-allylcysteine (SAC)

บทนำ

กระเทียมมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Allium sativum* L. ในวงศ์ Alliaceae เป็นพืชสมุนไพรเศรษฐกิจชนิดหนึ่งในประเทศที่มีความหลากหลายของสายพันธุ์ สามารถปลูกได้ง่ายเนื่องจากกระเทียมเป็นพืชล้มลุกที่มีลำต้นใต้ดิน เรียกว่า “หัว” ซึ่งมีกลีบย่อยหลายกลีบติดกันแน่น เนื้อสีขาว และมีกลิ่นเฉพาะตัว โดยอุดมไปด้วยไฟโตนิวเทรียนท์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย และมีสรรพคุณช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง, 2565; ชูติมา แก้วพิบูลย์ และณวงศ์ บุนนาค, 2564) แต่เนื่องจากราคากะเทียมมีความผันผวนสูง จึงมักเกิดปัญหากระเทียมล้นตลาด การจำหน่ายกระเทียมเกิดปัญหาหารขายไม่ทัน จนทำให้เกิดการเน่าเสียและส่งผลกระทบต่อราคาผลผลิตตกต่ำ (อรัญญา มานูจ่า และคณะ, 2560) และเพื่อเป็นการเสริมสร้างความเข้มแข็งจากเศรษฐกิจฐานรากของชุมชนสู่ความเป็นสากล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการยกระดับห่วงโซ่คุณค่า (value chain) ของอาหารภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจ BCG (bio circular green economy) ซึ่งเป็นแนวทางการพัฒนาที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ของสหประชาชาติอย่างน้อย 5 เป้าหมาย ได้แก่ การผลิตและบริโภคที่ยั่งยืน การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การอนุรักษ์ความหลากหลาย ความร่วมมือเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน การลดความเหลื่อมล้ำ อีกทั้งยังสอดคล้องกับปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งเป็นหลักสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทย ดังนั้นการยกระดับคุณภาพกระเทียมโดยมีการปฏิบัติที่ดีหลังการเก็บเกี่ยวและใช้สภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม สามารถถนอมคุณภาพของลักษณะและสารสำคัญของกระเทียมให้ได้มากที่สุด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564)

พื้นที่ปลูกกระเทียมที่สำคัญของภาคเหนือคือพื้นที่จังหวัดลำปาง เนื่องจากภูมิอากาศที่หนาวเย็น ทำให้การเพาะปลูกกระเทียมได้ผลดี จึงเหมาะสมกว่าการปลูกในภาคอื่น ๆ ซึ่งพันธุ์กระเทียมที่นิยมปลูกเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ พันธุ์เบา

ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 75-90 วัน และพันธุ์กลางที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 100-120 วัน ปัจจัยด้านอุณหภูมิมีผลต่อการเจริญเติบโตของกระเทียม โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและลงหัว คือ ประมาณ 12-13 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงกว่า 22 องศาเซลเซียส กระเทียมจะลงหัวเร็วกว่าปกติและส่งผลทำให้หัวกระเทียมมีขนาดเล็ก (กรมวิชาการเกษตร, 2567)

โครงการวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำ การศึกษาสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสมต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของกระเทียมไทย ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยด้านอุณหภูมิ (temperature) และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในการบ่มกระเทียมสดก่อนแปรรูปเป็นกระเทียมดำ (จิรายุ มุสิก และคณะ, 2565) อีกทั้งเพื่อลดปัญหาการเน่าเสียและคงคุณภาพสารสำคัญของกระเทียมไว้ได้นานมากยิ่งขึ้นเพื่อนำไปสู่การต่อยอดและยกระดับการพัฒนาหรือแปรรูปผลิตภัณฑ์กระเทียมมูลค่าสูงต่อไป เนื่องจากในกระเทียมมีสารสำคัญ เช่น สาร S-allylcysteine (SAC) ที่มีประสิทธิภาพยับยั้งความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมของเซลล์ในร่างกายสิ่งมีชีวิตที่สัมพันธ์กับการเกิดของโรคต่าง ๆ เช่น โรคความดัน และมะเร็ง (ชูติมา แก้วพิบูลย์ และ ณวงศ์ บุนนาค, 2564; อรัญญา มานูจ่า และคณะ, 2560) โดยผลการศึกษาวิจัยที่ได้ในครั้งนี้เป็นหนึ่งในโครงการวิจัยย่อยที่นำไปสู่การต่อยอดแผนงานสนับสนุนอาหารบนฐานรากแห่งความเชี่ยวชาญ ด้วยการปฏิบัติในเขตพื้นที่จังหวัดลำปางของมหาวิทยาลัยสวนดุสิต ศูนย์การศึกษา จังหวัดลำปาง ภายใต้โครงการวิจัยการพัฒนาห่วงโซ่เศรษฐกิจผลิตภัณฑ์กระเทียมดำ และเพื่อดูคุณสมบัติที่ดีของกระเทียมที่จะนำไปผลิตกระเทียมดำจะต้องมีลักษณะทางกายภาพและเคมีอย่างไร รวมทั้งส่งเสริมการส่งออก และช่วยเหลือเกษตรกรให้สามารถเพิ่มรายได้จากปัญหาการล้นตลาดของกระเทียมและยืดอายุการเก็บรักษาได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระเทียมสดพันธุ์เบา และพันธุ์กลาง ซึ่งก่อนการเก็บรักษาจะนำกระเทียมดังกล่าวไปวัดขนาดกลีบกระเทียมด้วยไม้บรรทัดเพื่อหาความกว้างและความยาว (เซนติเมตร) และเปรียบเทียบสีของกระเทียม (จากการสังเกต) ซึ่งกระเทียมที่ดำเนินการศึกษาค้างนี้เป็นกระเทียมที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2567

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาคุณภาพกระเทียมภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ต่างกัน โดยบรรจุกระเทียมในถุงซิปล็อคพลาสติก (polyethylene, PE) ขนาด 6x8 เซนติเมตร ที่ปิดมิดชิด ดังนั้นคือ กระเทียมพันธุ์เบาและกระเทียมพันธุ์กลาง เก็บรักษาที่ระดับอุณหภูมิ 1, 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-30%, 40-60% ระยะเวลาการเก็บรักษา 30 และ 60 วัน ในถุงพลาสติกใส ปริมาณการบรรจุ 40 กรัม/ถุง จำนวน 3 ซ้ำ ทั้งหมด 24 ตัวอย่าง

3. ศึกษาสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของกระเทียมไทย ได้แก่ ลักษณะเนื้อกระเทียม สีของกระเทียม และค่าสาร S-allylcysteine (SAC)

โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography ของห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ยี่ห้อ shimadzu รุ่น prominence

4. การศึกษาค้างนี้เป็นการทดลอง แฟกทอเรียล 2x2x2x3 (Factorial Design) และทดสอบความแตกต่างของสภาวะการเก็บรักษาด้วยสถิติ Nonparametric Kruskal – Wallis Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ลักษณะทางกายภาพของกระเทียมสด

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระเทียมสดพันธุ์เบาและพันธุ์กลางก่อนการเก็บรักษา พบว่ากระเทียมพันธุ์เบา กลีบกระเทียมมีขนาดความกว้างเฉลี่ย 1 เซนติเมตร ความยาวของกลีบเฉลี่ย 1.9 เซนติเมตร ส่วนกระเทียมพันธุ์กลาง กลีบกระเทียมมีขนาดความกว้างเฉลี่ย 1.2 เซนติเมตร ความยาวของกลีบเฉลี่ย 2.3 เซนติเมตร (Figure 1) ซึ่งจากผลการสังเกตลักษณะทางกายภาพภายนอกของกระเทียมดังกล่าว พบว่ากระเทียมพันธุ์เบา มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระเทียมพันธุ์กลาง

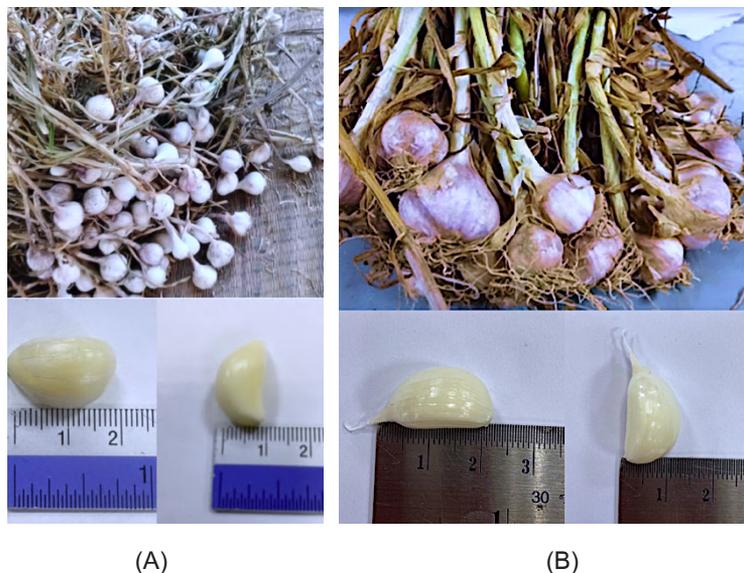


Figure 1 Appearance of garlic bulbs and clove sizes from an early-maturing variety (A) and a medium-maturing variety (B)

จากการเปรียบเทียบสีของกระเทียมพันธุ์เบา พบว่ากระเทียมพันธุ์เบา กลีบกระเทียมมีสีชมพูอมเหลืองเล็กน้อย ลักษณะหัวค่อนข้างกลมมน ส่วนกระเทียมที่พันธุ์กลาง กลีบ

กระเทียมมีสีชมพูอมเหลืองเล็กน้อย ลักษณะหัวค่อนข้างเรียวยาว (Table 1)

Table 1 Physical characteristics of fresh garlic

Garlic variety	Physical characteristics of fresh garlic
Early-maturing garlic	The garlic peels had been white, the garlic cloves had been white mixed with yellow, and the garlic flesh had been firm and shiny, with rather rounded cloves.
Medium-maturing garlic	The garlic peels had been purple mixed with white, the garlic cloves had been white mixed with purple, and the garlic flesh had been firm and shiny, with rather slender cloves.

2. ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพและเคมี

2.1 ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพ

เมื่อเก็บรักษากระเทียมสดพันธุ์เบาและพันธุ์กลางในสภาวะต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิ 1 และ 4 องศา

เซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-30%, 40-60% ณ ระยะเวลาการเก็บรักษา 30 และ 60 วัน ที่แตกต่างกัน พบว่า สภาวะการเก็บรักษาที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของกระเทียม โดยเฉพาะด้านสีที่แตกต่างกัน (Table 2) และ (Figure 2-3)

Table 2 Physical characteristics of storage period for 30 days and 60 days

Garlic variety	Storage period for 30 days		Storage period for 60 days	
	Temperature at 1°C and 10-30%RH	Temperature at 4°C and 40-60%RH	Temperature at 1°C and 10-30%RH	Temperature at 4°C and 40-60%RH
Early-maturing garlic	The garlic cloves were a translucent white with a hint of yellow, their texture firm and slightly shiny.	The garlic cloves, white with a medium yellow tint, had a firm, matte texture.	The garlic cloves were deep yellow with a soft, matte texture.	The garlic cloves were medium yellow with a soft, matte texture.
Medium-maturing garlic	The garlic cloves were translucent white with a hint of yellow, their texture firm and slightly shiny.	The garlic cloves were white with a medium yellow tinge and had a firm texture. The glossiness had reduced.	The garlic cloves were dark yellow and had a soft texture. The glossiness had reduced.	The garlic cloves were medium-dark yellow in color and had a soft texture. The glossiness had reduced.

จากการบรรจุกระเทียมสดในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดและเก็บรักษาในตู้เย็นครั้งนี้ (Table 2) พบว่า การเก็บรักษากระเทียมในถุงพลาสติกที่ 30 วัน และ 60 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 1 และ 4 องศาเซลเซียส สามารถรักษาความชื้นของเนื้อกระเทียมไว้ได้ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะเนื้อสัมผัสของกลีบกระเทียมที่ระยะเวลา 30 วันยังมีความแน่นและคงความมันวาวไว้ได้ แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 60 วัน ลักษณะเนื้อสัมผัสของกลีบกระเทียมเริ่มมีความนิ่มและความมันวาวลดลงโดยที่ไม่ส่งผลให้กลีบกระเทียมแห้งหรือสูญเสียความชื้นแต่อย่างใด และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของสีกลีบกระเทียม ณ ระยะเวลาการเก็บรักษากระเทียมในถุงพลาสติกที่ 30 วัน และ 60 วัน ในระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่างกัน พบว่า กระเทียมที่เก็บรักษาในความชื้นสัมพัทธ์ 10-30%

และ 40-60% สามารถลดการสูญเสียของไอน้ำได้ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ กนกพร บุญญะอดิชาติ (2558) ที่กล่าวว่า ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเก็บรักษาและลดการสูญเสียไอน้ำโดยระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าช่วยป้องกันการสูญเสียไอน้ำได้ดีกว่า ดังนั้นกระเทียมที่เก็บรักษาในความชื้นสัมพัทธ์ที่ 40-60% จึงสูญเสียไอน้ำได้ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 10-30% ตามลำดับ

นอกจากนั้นการเก็บรักษากระเทียมในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทจะส่งผลทำให้กระเทียมมีลักษณะสีที่แตกต่างกันเล็กน้อย (Figure 2-3) โดยกระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลาง ณ ระยะเวลาการเก็บรักษากระเทียมในถุงพลาสติกที่ 30 วัน และ 60 วัน ภายใต้อุณหภูมิที่ 1 และ 4 องศาเซลเซียส กับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 10-30% และ 40-60% ลักษณะสีของ

กระเทียมแตกต่างกันเล็กน้อย คือ กระเทียมที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ(1 องศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (10-30%) รวมทั้งใช้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่น้อยกว่า (30 วัน) จะมีสีที่อ่อนกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระเทียมที่เก็บรักษา ณ ระยะเวลาที่นานขึ้น (60 วัน) (Figure 2-3) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานการศึกษาของ พฤตญา นิลประพฤกษ์ และคณะ (2566) ที่กล่าวว่า การเก็บรักษาผักและผลไม้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานานจะส่งผลทำให้เยื่อหุ้มเมมเบรนของพืชถูกทำลาย โดยมีความสัมพันธ์กับสารประกอบฟีนอล (phenol) และกิจกรรมของเอนไซม์ Phenylalanine ammonia lyase (PAL) และ Polyphenol oxidase (PPO) ภายในผลโดยตรง ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลจากกระเทียม เนื่องมาจากเอนไซม์ (enzymatic browning)

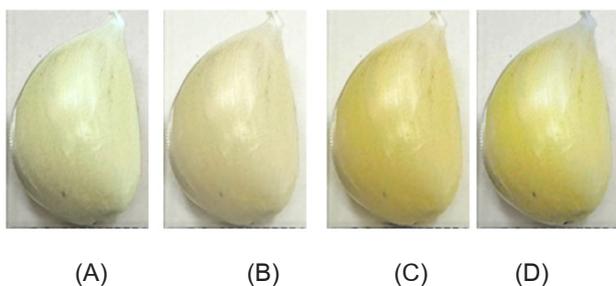


Figure 2 Changes in garlic clove color of an early-maturing garlic variety under different storage conditions: (A) stored at 1°C with 10-30%RH for 30 days, (B) stored at 4°C with 40-60%RH for 30 days, (C) stored at 1°C with 10-30%RH for 60 days, and (D) stored at 4°C with 40-60%RH for 60 days.

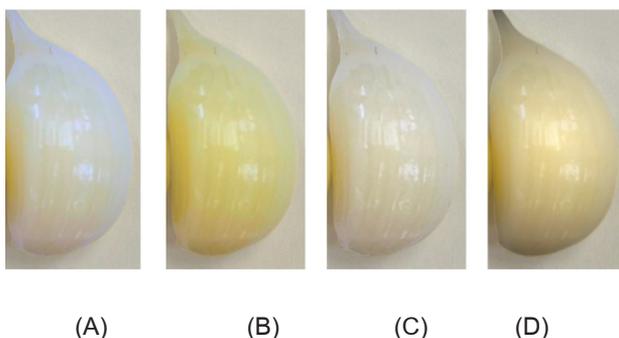


Figure 3 Changes in garlic clove color of medium-maturing garlic variety under different storage conditions: (A) stored at 1°C with 10-30%RH for 30 days, (B) stored at 4°C with 40-60%RH for 30 days, (C) stored at 1°C with 10-30%RH for 60 days, and (D) stored at 4°C with 40-60%RH for 60 days.

2.2 ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางเคมีของกระเทียม

จากการศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางเคมีของกระเทียมเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมีของค่าสาร S-allylcysteine (SAC) ในกระเทียมพันธุ์เบา และพันธุ์กลาง พบว่า ปริมาณสาร SAC ของกระเทียมพันธุ์เบา ณ สภาวะการเก็บรักษา 30 และ 60 วัน ที่อุณหภูมิต่ำ 1 และ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 10-30% และ 40-60% ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนปริมาณสาร SAC ของกระเทียมพันธุ์กลาง ณ สภาวะการเก็บรักษา 30 และ 60 วัน ที่อุณหภูมิต่ำ 1 และ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 10-30% และ 40-60% มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ($p < 0.05$) (Table 3)

Table 3 Average of SAC in storage periods for 30 days and 60 days, temperature at 1 and 4 degree celsius and relative humidity 10-30% และ 40-60%

Storage periods	Average of SAC (mg/g)	
	Early-maturing garlic	Medium-maturing garlic
30 days		
- 1°C, 10-30% RH	1.36	0.94
- 4°C, 40-60% RH	1.41	0.95
60 days		
- 1°C, 10-30% RH	2.13	0.97
- 4°C, 40-60% RH	2.70	0.98
%CV	29%	2%

Table 4 Average for groups in homogeneous subsets

Status	Subset for alpha = 0.05			
	1	2	3	4
Medium-maturing garlic, 1°C 10-30% RH , 30 days	0.9433			
Medium-maturing garlic, 4°C, 40-60% RH , 30 days	0.9433			
Medium-maturing garlic, 1°C 10-30% RH , 60 days	0.9667			
Medium-maturing garlic, 4°C, 40-60% RH , 60 days	0.9800			
Early-maturing garlic, 1°C 10-30% RH , 30 days		1.3600		
Early-maturing garlic, 4°C, 40-60% RH , 30 days		1.4133		
Early-maturing garlic, 1°C 10-30% RH , 60 days			2.1267	
Early-maturing garlic, 4°C, 40-60% RH , 30 days				2.7000
Chi-Square (p-value)			0.02*	

(*p<0.05)

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณสาร SAC ในกระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลาง (Table 3) ภายใต้ อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส กับ 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-30% กับ 40-60% พบว่า ปริมาณสาร SAC ในกระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลาง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% มีค่ามากกว่าอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 10-30%

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสภาวะการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณสาร SAC ของกระเทียม โดยในกระเทียมพันธุ์เบา พบสาร SAC ในปริมาณที่มากกว่ากระเทียมพันธุ์กลาง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาครั้งนี้ คือ ระยะเวลาการเก็บรักษา 60 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และแตกต่างจากสภาวะอื่นอย่าง มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Table 4) หากพิจารณาการศึกษาของ Quan *et al.* (2020) พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณสาร SAC ในกระเทียม โดยผลการวิจัยได้ดำเนินการทดลองนำกระเทียมสดเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -4 ถึง 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วันในตู้เย็น หลังจากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน ซึ่งผลการทดลองพบว่า กระเทียมสดที่ทำการทดลองพบปริมาณสาร SAC เฉลี่ยเท่ากับ 53.2 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนกระเทียมที่ผ่านการเก็บรักษาอุณหภูมิ -4 ถึง 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วันในตู้เย็น และอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบปริมาณสาร SAC เพิ่มขึ้น เฉลี่ยเท่ากับ 663.6 ไมโครกรัมต่อกรัม

อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการศึกษาลบส่วนใหญ่พบปริมาณสาร SAC ในกระเทียมสดน้อยมาก แต่ผลการศึกษานี้ทำให้พบว่าสภาวะการเก็บรักษากระเทียมสดที่เหมาะสมภายใต้

อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% สามารถทำให้ปริมาณสาร SAC ในกระเทียมสดเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกัน

สรุป

จากการศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อลักษณะทางกายภาพครั้งนี้ พบว่า แนวทางในการช่วยเหลือเกษตรกรผู้ปลูกกระเทียมพันธุ์เบาและพันธุ์กลางให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษากระเทียมสดไม่ให้น่าเสียและเพิ่มรายได้จากปัญหาการล้นตลาดของกระเทียมนั้น เกษตรกรควรเก็บรักษากระเทียมสดโดยในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดและเก็บรักษาในตู้เย็น ที่สภาวะอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40-60% เป็นระยะเวลา 60 วัน ก่อนนำไปจำหน่ายและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กระเทียมต่อไป

ดังนั้นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รวมทั้งระยะเวลาการเก็บรักษากระเทียมสดส่งผลต่อปริมาณสาร SAC ซึ่งเป็นสารสำคัญในกระเทียม

เอกสารอ้างอิง

- กนกพร บุญญะอดิชาติ. (2558). การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวและปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียปริมาณและคุณภาพของผักรับประทานใบ. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 7(3), 147–158.
- กรมวิชาการเกษตร. (2567). *เอกสารวิชาการศัตรูพืชกักกันที่สำคัญของกระเทียม*. <http://lib.doa.go.th/multim/e-book/EB00242.pdf>
- จิรายุ มุสิกกา, ธนวรรณ มุสิกกา และพนารัตน์ สังข์อินทร์. (2565). สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระเทียมดำต่อคุณสมบัติ

- ทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กระเทียมดำ. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2(2), 54–62.
- ชุตินา แก้วพิบูลย์ และณวงศ์ บุนนาค. (2564). การประเมิน
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกระเทียมโทนดำ. วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ววท), 29(1), 111–118.
- พฤติยา นิลประพุกษ์, เทอญฤดี หนูยี่ง และพิมพ์พี อาสา
สันติ. (2566). บทบาทของเมลานินต่ออาการไส้สี
น้ำตาลของผลับประดที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง. วารสารแก่น
เกษตร, 51(1), 533–538.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง. (2565). พันธุ์กระเทียมไทย.
<https://www.hrdi.or.th/Articles/Detail/31>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). ผลผลิตกระเทียมแยก
ตามจังหวัด ปี 2564. [http://mis-app.oae.go.th/product/
กระเทียม](http://mis-app.oae.go.th/product/กระเทียม)
- อรัญญา มานูจำ, มลฤดี อย่างบุญ, พัฒนชัย สายคุณ, บิลัน
ธนา ชมชื่นชู, วิภาพร บุญทะเลา, นฤทธิ วาดเขียน และ
กรุณรัตน์ สกุลนามรัตน์. (2560). คุณสมบัติเคมีและ
กายภาพของกระเทียมดำศรีสะเกษ. ใน การประชุม
วิชาการระดับชาติ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ”
2017 “วิจัยจากองค์ความรู้การพัฒนาอย่างมั่นคง มั่งคั่ง
และยั่งยืน” (น. 25-26). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน วิทยาเขตสุรินทร์.
- Quan, N. X. H., Nga, V. T., Nhi, D. N. K., Duong, N. T.
T., Vinh, H. N., Phung, N. K. P., & Thu, N. T. H.
(2020). Physicochemical character of fresh and black
garlic: 12-day thermal aged process. *Vietnam Jour-
nal of Chemistry*, 58(4), 500–505.

กายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบเนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชวงศ์เข็ม (Rubiaceae) บางชนิดในมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

Comparative leaf epidermal anatomy of some species of the family Rubiaceae in Roi Et Rajabhat University

สุทาร์ตน์ คนขยัน^{1*}, เบญญาภา พลศรี² และ ภณิดา เถาว์ชาลี²

Sutarat Khonkayan^{1*}, Benyapa Ponsri² and Panida Taochalee²

Received: 6 November 2024 ; Revised: 8 January 2025 ; Accepted: 13 March 2025

บทคัดย่อ

ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของพืช เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการศึกษาด้านอนุกรมวิธาน ประกอบกับข้อมูลพื้นฐานสำหรับการระบุชนิดพืชวงศ์เข็มมีน้อย การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาลักษณะของเนื้อเยื่อชั้นผิวใบที่สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางอนุกรมวิธานในการระบุชนิดของพืช พืชวงศ์เข็ม (Rubiaceae) ที่พบในมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด จำนวน 14 สกุล 20 ชนิด ประกอบด้วยสกุล *Ixora*, *Gardenia*, *Hedyotis*, *Oldenlandia*, *Spermacoce* และ *Morinda* สกุลละ 2 ชนิด *Catunaregam*, *Cynanchum*, *Hamelia*, *Mitragyna*, *Mitracarpus*, *Mussaenda*, *Paederia* และ *Rothmannia* สกุลละ 1 ชนิด ด้วยวิธีการลอกผิวใบและการทำให้แผ่นใบใส ย้อมด้วยสีซาฟรานิน ความเข้มข้น 1% ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ทั่วไปของพืชวงศ์เข็มคือ 1) รูปร่างของเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวมีรูปร่างหลายเหลี่ยม รูปร่างไม่แน่นอน และรูปร่างคล้ายจิกซอร์ 2) ชนิดของปากใบเป็นแบบพาราไซติก 3) ชนิดของขนเป็นแบบขนหลายเซลล์ ขนเซลล์เดี่ยว และขนรูปโล่ 4) มีรูปแบบของผิวเคลือบคิวทินเป็นผิวเรียบ เป็นปุ่มหรือเป็นริ้วเรียงขนาน และ 5) รูปแบบของสารสะสมเป็นผลึกรูปดาว ผลึกรูปปริซึม ผลึกรูปเข็ม ผลึกรูปเม็ดทราย ผลึกรูปแท่ง พบเซลล์เม็ดน้ำมันและเซลล์สะสมสารติดสีแดงเข้ม ลักษณะกายวิภาคดังกล่าวเบื้องต้นมีความสำคัญต่ออนุกรมวิธานอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการระบุพืชบางชนิดหรือบางสกุลได้

คำสำคัญ: กายวิภาคศาสตร์พืช, เนื้อเยื่อชั้นผิวใบ, พืชวงศ์ Rubiaceae

Abstract

Anatomical characteristics of plants are important data for taxonomic studies. Additionally, there is little basic data available to be used for identifying species in the Rubiaceae family. The objective of this research is to identify the characteristics of leaf epidermal tissue that can be used as a taxonomic tool for species identification. Leaf epidermal characteristics were examined in 20 species across 14 genera of the Rubiaceae family found at Roi Et Rajabhat University. The species investigated included two species each of *Gardenia*, *Hedyotis*, *Ixora*, *Morinda*, *Oldenlandia* and *Spermacoce* and one species each of *Catunaregam*, *Cynanchum*, *Hamelia*, *Mitragyna*, *Mitracarpus*, *Mussaenda*, *Paederia* and *Rothmannia*. Specimens were prepared using leaf epidermal peeling and clearing techniques and stained with 1% safranin. The generalized anatomical characteristics of the family were as follows: 1) Epidermal cell shapes were polygonal, irregular and jigsaw-like; 2) Stomata were of the paracytic type; 3) Trichome types included multicellular hairs, unicellular hairs and peltate hairs; 4) The cuticle patterns were either

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

² หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

¹ Assistant Professor, Department of Science and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Roi-Et Rajabhat University

² Bachelor of Science Program in Biology, Faculty of Liberal Arts and Science, Roi-Et Rajabhat University

* Corresponding author, e-mail: sutarat25@gmail.com

smooth, papillose or striate; and 5) Inclusion types included druse crystals, prismatic crystals, raphide crystals, sand crystals, styloid crystals, oil bodies and red staining inclusions cell. These leaf features have significant taxonomic value and can be effectively used to identify specific species or genera within the Rubiaceae family.

Keywords: Plant anatomy, leaf epidermis, Rubiaceae

บทนำ

พืชวงศ์เข็ม (Rubiaceae) จัดเป็นพืชที่มีความหลากหลายสูงวงศ์หนึ่งของโลก มีการกระจายพันธุ์ของพืชวงศ์เข็มทั่วโลกประมาณ 630 สกุล 10,200 ชนิด (Mabberley, 1997) เป็นองค์ประกอบสำคัญของไม้ชั้นล่างในป่าดิบชื้น (Gardner *et al.*, 2000) ในประเทศไทยมี 110 สกุล ประมาณ 600 ชนิด (รวมทั้งพืชต่างถิ่น) (Puff *et al.*, 2005) นับเป็นพรรณไม้ที่มีความหลากหลาย แต่ยังไม่สามารถระบุจำนวนชนิดที่แน่นอนได้ เนื่องจากการศึกษาเพื่อจัดทำหนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย (Flora of Thailand) ยังไม่แล้วเสร็จแม้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง 20 ปี เนื่องมาจากอุปสรรคคือโอกาสในการพบดอกและผล (Puff *et al.*, 2005) ปัญหาในการระบุชนิดพืชวงศ์เข็มที่ไม่พบดอกและผลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกับนักพฤกษศาสตร์เท่านั้น แต่ยังเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับผู้ศึกษาเกี่ยวกับพรรณพืชโดยทั่วไป เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณในการสำรวจพื้นที่ ทำให้ไม่สามารถเข้าถึงได้ทุกฤดูกาล ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุชนิดของพืชในระยะที่ไม่มีดอกและผล จึงสามารถทำได้โดยการศึกษาด้านกายวิภาคศาสตร์เนื้อเยื่อชั้นผิวใบ เพื่อพัฒนารูปวิธีที่สามารถช่วยระบุชนิดพืชได้

พืชวงศ์เข็มมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจมาก เช่น กาแฟ (*Coffea arabica* L.) นำมาใช้ในการผลิตเครื่องดื่มกาแฟ คิวินิน (*Cinchona pubescens* Vahl) นำมาสกัดเป็นยาคิวินินรักษาไข้มาลาเรีย พรรณไม้ในสกุลโอบ (*Uncaria*) บางชนิดเป็นยาสมุนไพรรักษาโรค (จำลอง เพ็งคล้าย และคณะ, 2518) พรรณไม้ในสกุลเข็ม (*Ixora*) สกุลพุด (*Gardenia*) และสกุลคัตเค้า (*Randia*) นิยมปลูกเป็นไม้ประดับ ปัจจุบันนี้มีการนำพืชวงศ์เข็มมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่ เป็นพืชที่ให้กลิ่นหอมและทำเครื่องใช้ เช่น กระพุ่ม (*Anthocephalus chinensis* Walp.) ผ่าด้าม (*Gardenia coronaria* Buch.-Ham) เข็มใหญ่ (*Pavetta aspera* Craib) และหมักหม้อ (*Rothmannia wittii* Craib) ปลูกเป็นไม้ประดับและทำเครื่องดีม เช่น กาแฟโรบัสตา (*Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner) ใช้เป็นสมุนไพร เช่น ยอเถื่อน (*Morinda elliptica* (Hook.f.) Ridl.) คัตเค้า (*Randia longiflora* Lam.) กระท่อม (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.) และตะลุมพุก (*Catunaregam*

uliginosa (Poir.) Tirveng.) รวมถึงเปลือกต้นและรากใช้ในการผลิตสีย้อม ใบและผลใช้ในการประกอบอาหาร และการนำมาปลูกเป็นไม้ดอกไม้ประดับ เป็นต้น (สุรินทร์ แข่งขัน และคณะ, 2555)

การศึกษากายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้เป็นเครื่องมือในการจำแนกและระบุพืชได้เนื่องจากเซลล์และเนื้อเยื่อที่มีลักษณะเฉพาะตัวตามพันธุกรรมไม่เปลี่ยนแปลงตามสิ่งแวดล้อม (Jones & Luchsinger, 1987) นอกจากนี้ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ยังช่วยจำแนกพืชที่อยู่ในสภาพที่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนสมุนไพร ผงเครื่องเทศ ชิ้นส่วนในระบบทางเดินอาหารซึ่งจะเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ ชิ้นส่วนพืชที่ถูกทับถมในชั้นดินและหินยังใช้เป็นข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาและโบราณคดีได้ตามลำดับ (Metcalf & Chalk, 1950; Dickison, 2000) แม้กายวิภาคศาสตร์จะเป็นความรู้พื้นฐานที่มีประโยชน์ แต่ข้อมูลดังกล่าวในพืชวงศ์เข็มยังมีน้อย โดยเฉพาะการศึกษาเพื่อนำลักษณะไปใช้ในการระบุชนิด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มพูนข้อมูลด้านกายวิภาคศาสตร์ของพืชกลุ่มนี้ ทั้งจำนวนชนิดและเขตการกระจายพันธุ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดตั้งอยู่ในจังหวัดร้อยเอ็ดภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นสถาบันการศึกษาแห่งหนึ่งที่พื้นที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูง มีระบบนิเวศเป็นป่าโคกทุ่งบ่อเป็นป่าดิบแล้ง มีเนื้อที่ประมาณ 137 ไร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ปกปักและแหล่งเรียนรู้ของมหาวิทยาลัย ทั้งทางนิเวศวิทยาและภูมิปัญญาพื้นบ้าน

อย่างไรก็ตาม พบข้อมูลการศึกษาพรรณไม้ในมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดส่วนใหญ่เป็นการบรรยายลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายงานสรรพคุณของพืชเพียงบางชนิดเท่านั้น ยังไม่พบข้อมูลการศึกษาด้านกายวิภาคศาสตร์เฉพาะกลุ่มของพืช ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาและเป็นข้อมูลพื้นฐานทางกายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบเนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชวงศ์เข็มในมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด โดยการลอกผิวใบ (Peeling method) และการทำแผ่นใบใส (Clearing method) เพื่อค้นหาลักษณะที่สามารถนำมาใช้สร้างรูปวิธีในการระบุชนิดหรือใช้สำหรับการตรวจสอบและรับรองพืช

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลด้านอื่นๆ อันจะเป็นผลให้การจำแนกและระบุพืชวงศ์นี้มีความสมบูรณ์ และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยด้านกายวิภาคศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายพันธุ์ของพืชวงศ์เข็มจากหนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย (Flora of Thailand) (Puff *et al.*, 2021) พร้อมศึกษาตัวอย่างพรรณไม้แห้งในพิพิธภัณฑ์พืชกรุงเทพฯ (BK) และหอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช (BKF)

2. สืบค้นและเก็บตัวอย่างพืชในภาคสนาม ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2566 – กุมภาพันธ์ 2567 บริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด โดยตัวอย่างที่ศึกษาจำนวน 14 สกุล 20 ชนิด ชนิดละ 10 ตัวอย่าง (Table 1) นำตัวอย่างที่เก็บได้ส่วนหนึ่งมารบุงชนิดและจัดทำเป็นตัวอย่างพรรณไม้แห้งสำหรับการอ้างอิง เก็บไว้ที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด และอีกส่วนหนึ่งรักษาสภาพเซลล์ไว้ในเอทานอล 70% เพื่อศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของเนื้อเยื่อชั้นผิวใบ

3. ศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของเนื้อเยื่อชั้นผิวใบ โดยนำตัวอย่างที่รักษาสภาพเซลล์ในเอทานอล 70% มาล้างด้วยน้ำกลั่น ลอกผิวใบทั้งด้านบนและด้านล่างโดยใช้ใบมีดโกนขูดผิวใบด้านที่ไม่ต้องการออกหรือหยดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 10% หรือแช่ในสารละลายคลอโรกซ์ (Clorox) ความเข้มข้น 10% ใช้เวลาตามความเหมาะสมจนกระทั่งผิวใบบาง แล้วล้างสารละลายออกจากชั้นตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ย้อมสีตัวอย่างด้วยสีซาฟรานิน (Safranin) ความเข้มข้น 1% ที่ละลายในน้ำนาน 5-10 นาที ล้างสีส่วนเกินออกด้วยน้ำและดึงน้ำออกจากชั้นตัวอย่าง โดยแช่ในเอทานอลที่มีความเข้มข้น 15%, 30%, 50%, 70%, 95% และ 100% ขึ้นตอนละ 5 นาที ตามลำดับ จากนั้นแช่ในเอทานอล 100% ผสมกับไซลีน (Xylene) อัตราส่วน 1:1 นาน 10 นาที นำชิ้นตัวอย่างมาแช่ต่อในไซลีนบริสุทธิ์ (Pure xylene) นาน 15 นาที ผึ่งสีไลต์ด้วยดีพีเอ็กซ์ (DePeX mounting medium, DPX) จากนั้นตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope)

4. ศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของเนื้อเยื่อชั้นผิวใบ ความหนาแน่นของเซลล์ ชนิดและความหนาแน่นของปากใบ ความยาวเซลล์คุม ความยาวของขนแบบต่างๆ และสารสะสมภายในเซลล์จากสไลด์ถาวรที่เตรียมได้ และบันทึกภาพด้วยกล้อง OPTIKA B-1000 FL HBO ลักษณะละ 10 ซ้ำ สร้างรูปวิธานระบุชนิดและหาค่าดัชนีความหนาแน่นของปากใบ (Stomatal Index) ตามสูตรของ Salisbury (1927)

Table 1 List of samples used in the study

Scientific name	Native name	Collection number
1. <i>Catunaregam tomentosa</i> (Blume ex DC.) Tirveng.	หนามแท่ง	Rubia01
2. <i>Cynanchum pulchellum</i> Wall.	ข้าวสาร	Rubia02
3. <i>Gardenia carinata</i> Wall. ex Roxb.	พุดน้ำบุศย์	Rubia03
4. <i>G. jasminoides</i> J.Ellis	พุดซ้อน	Rubia04
5. <i>Hamelia patens</i> Jacq.	ประทัดใต้หวั่น	Rubia05
6. <i>Hedyotis pachycarpa</i> Ridl.	ตองแห้ง	Rubia06
7. <i>H. ovatifolia</i> Cav.	ผักค้างคาว	Rubia07
8. <i>Ixora lobbii</i> King & Gamble	เข็มป่าแดง	Rubia08
9. <i>I. chinensis</i> Lam.	เข็มแดง	Rubia09
10. <i>Mitracarpus hirtus</i> (L.) DC.	หญ้าจุกขาว	Rubia10
11. <i>Mitragyna speciosa</i> (Roxb.) Korth.	กระท่อม	Rubia11
12. <i>Morinda citrifolia</i> L.	ยอบ้าน	Rubia12
13. <i>M. pubescens</i> Sm.	ยอป่า	Rubia13
14. <i>Mussaenda philippica</i> Queen	ดอนญา	Rubia14

Table 1 List of samples used in the study (continue)

Scientific name	Native name	Collection number
Sirikit		
15. <i>Oldenlandia biflora</i> L.	หมากดิบน้ำค้าง	Rubia15
16. <i>O. corymbosa</i> L.	หญ้าลิ้นงู	Rubia16
17. <i>Paederia linearis</i> Hook. f.	ตดหมุดตดหมา	Rubia17
18. <i>Ridsdalea wittii</i> (Craib) J.T.Pereira	หมักหม้อ	Rubia18
19. <i>Spermacoce remota</i> Lam.	หญ้าเขมร	Rubia19
20. <i>S. latifolia</i> Aubl.	กระดุมใบใหญ่	Rubia20

ผลการวิจัย

เนื้อเยื่อชั้นผิวใบด้านบน (Table 2) จำนวนเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวของ *M. philippica* มีความหนาแน่นของเซลล์เฉลี่ยมากที่สุด คือ 1,139.3 เซลล์ต่อตารางมิลลิเมตร และ *M. hirtus* มีความหนาแน่นของเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 162.3 เซลล์ต่อตารางมิลลิเมตร เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวของพืชที่ศึกษาส่วนใหญ่มีรูปร่างแบบหลายเหลี่ยม (Figure 1 A) ยกเว้นใน *G. jasminoides*, *H. pachycarpa*, *I. lobbii*, *M. philippica* และ *C. pulchellum* มีเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวแบบไม่แน่นอน (Figure 1 B) และ *R. wittii*, *O. corymbosa*, *M. hirtus* มีเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวคล้ายจิกซอร์ พืชส่วนใหญ่มีผนังเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวเรียบ พบปากใบที่ผิวใบด้านบนแบบพาราไซติกในพืช 4 ชนิด ได้แก่ *S. remota*, *S. latifolia*, *M. hirtus* และ *R. wittii* โดยพบความหนาแน่นของปากใบสูงสุด 148 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร ค่าดัชนีความหนาแน่นของปากใบคือ 30.47% ใน *S. remota* และพบความยาวของเซลล์คุมสูงสุดเท่ากับ 34.5 ไมโครเมตร ใน *M. hirtus* นอกจากนี้ในเนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชส่วนใหญ่พบขนแบบเซลล์เดี่ยว (Figure 2 A, D) ใน *M. philippica* มีความยาวขนเฉลี่ยมากที่สุด คือ 440.7 ไมโครเมตร เนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชที่ศึกษาส่วนใหญ่มีผิวเคลือบคิวทินเป็นผิวเรียบ ชนิดของสารสะสม ได้แก่ ผลึกรูปดาว ผลึกรูปปริซึม (Figure 2 H) ผลึกรูปเม็ดทราย ผลึกรูปแท่ง ผลึกรูปเข็ม พบเซลล์เม็ดน้ำมันและเซลล์สะสมสารติดสีแดงเข้ม

เนื้อเยื่อชั้นผิวใบด้านล่าง (Table 3) จำนวนเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวของ *H. patens* มีความหนาแน่นของเซลล์เฉลี่ยมากที่สุด คือ 918.7 เซลล์ต่อตารางมิลลิเมตร และ *H. ovatifolia* มีความหนาแน่นของเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 124 เซลล์ต่อตารางมิลลิเมตร เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวใบส่วนใหญ่มีรูปร่างไม่แน่นอนและคล้ายจิกซอร์ ยกเว้นใน *C. tomentosa* และ *I. chinensis* ที่มีเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวแบบหลายเหลี่ยม พืชส่วนใหญ่มีผนังเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิว

หยาบ พบปากใบแบบพาราไซติกในพืชทุกชนิดที่ศึกษา (Figure 1 C-F) โดย *M. philippica* มีความหนาแน่นของปากใบเฉลี่ยมากที่สุด คือ 378.6 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร และ *H. patens* ความหนาแน่นของปากใบเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 22.5 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร พบเซลล์คุมมีความยาวสูงสุดเท่ากับ 209 ไมโครเมตร ใน *H. pachycarpa* ใน *H. ovatifolia* มีค่าดัชนีความหนาแน่นของปากใบมากที่สุดคือ 46.02% และใน *H. patens* มีค่าดัชนีความหนาแน่นของปากใบน้อยที่สุดคือ 2.40% นอกจากนี้ยังพบขน 3 แบบ คือขนแบบเซลล์เดี่ยว (Figure 2 C) ขนหลายเซลล์ (Figure 2 B) และขนรูปโล่ โดย *P. linearis* มีความยาวขนเฉลี่ยมากที่สุด คือ 557.3 ไมโครเมตร เนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชที่ศึกษามีผิวเคลือบคิวทินเป็นผิวเรียบ ชนิดของสารสะสม ได้แก่ ผลึกรูปเม็ดทราย ผลึกรูปดาว (Figure 2 G) ผลึกรูปปริซึม ผลึกรูปเข็ม พบเซลล์เม็ดน้ำมัน (Figure 2 F) และเซลล์สะสมสารติดสีแดงเข้ม (Figure 2 E)

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษากายวิภาคศาสตร์เนื้อเยื่อชั้นผิวใบของพืชวงศ์เข็ม พบว่าสามารถนำมาใช้พิจารณาจำแนกได้ ดังต่อไปนี้ (Table 2, 3)

1. **รูปร่างของเซลล์** เนื้อเยื่อชั้นผิวใบด้านบนและด้านล่าง มีรูปร่างเซลล์ 3 แบบ คือ 1) รูปร่างไม่แน่นอน 2) รูปร่างคล้ายจิกซอร์ และ 3) รูปร่างหลายเหลี่ยม ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเซลล์ส่วนใหญ่มีรูปร่างหลายเหลี่ยมที่เนื้อเยื่อชั้นผิวใบด้านบน สอดคล้องกับการศึกษาของ ปริมประภา ภูสงสี (2561) ศึกษากายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบพืชสกุลหญ้าอ้อยก่า (วงศ์เข็ม) ในประเทศไทย พบว่าเนื้อเยื่อชั้นผิวใบด้านล่างมีรูปร่างไม่แน่นอน ยกเว้นใน *Hedyotis ternata* ที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยม ซึ่งรูปร่างของเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวสามารถนำมาใช้ในการจำแนกและระบุชนิดของสกุลนี้ได้ ดังนั้น จากการศึกษากายวิภาคศาสตร์ครั้งนี้จึงสามารถนำลักษณะดังกล่าวเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการแยกพืช อย่างไรก็ตามการใช้รูปร่างของเซลล์ในการจัด

จำแนกหรือระบุชนิด ควรคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่พืชอาศัยอยู่ด้วย เพราะอาจมีผลทำให้ลักษณะกายวิภาคศาสตร์เกิดความผันแปรได้ (Metcalf & Chalk, 1957)

2. ลวดลายของผิวเคลือบคิวทิน เนื้อเยื่อชั้นคิวไบด้านบน สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ เป็นผิวเรียบเป็นปุ่ม และเป็นริ้วเรียงขนาน ส่วนเนื้อเยื่อชั้นคิวไบด้านล่างพบผิวเคลือบคิวทิน 2 แบบ คือ เป็นผิวเรียบ และเป็นริ้วเรียงขนาน สอดคล้องกับการศึกษาของ Stace (1965) ที่กล่าวถึงข้อจำกัดของลวดลายผิวเคลือบคิวทินต่อการศึกษาด้านอนุกรมวิธาน ซึ่งสามารถใช้ในการจำแนกในพืชบางกลุ่มเท่านั้น

3. ลักษณะของขน พบขนมีการกระจายบริเวณต่างๆ ทั้งในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบด้านบนและด้านล่าง 3 ชนิด ได้แก่ ขนแบบเซลล์เดี่ยว ขนแบบหลายเซลล์และขนรูปโล่ สอดคล้องกับการศึกษาของ อุไรวรรณ กุศลช่วย (2554) สำรวจพืชที่มีขนที่พบในบริเวณแอ่งน้ำ อำเภอบางบาล จังหวัดสงขลา เพื่อสนับสนุนนิติวิทยาศาสตร์ พบว่าลักษณะขนบางลักษณะสามารถใช้เป็นเกณฑ์ประกอบในการจำแนกชนิดพืชในระดับวงศ์หรือพืชบางสกุลได้ โดยพบขนแบบเซลล์เดี่ยว ขนแบบหลายเซลล์ ปลายขนเรียวยแหลม ในพืชสกุล *Borreria* และ *Mussaendra* จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าพืชบางชนิดมีลักษณะเฉพาะที่สามารถแยกออกจากกลุ่มที่ศึกษาทั้งหมดได้ เช่น ใช้ลักษณะของขนรูปโล่ในการระบุชนิดของ *Cynanchum pulchellum* ได้

4. รูปแบบของปากใบ การศึกษาครั้งนี้พบปากใบเพียงชนิดเดียว คือ แบบพาราไซติก ส่วนใหญ่พบที่ผิวใบด้านล่าง โดยมีความหนาแน่นของปากใบที่ผิวใบด้านบนเฉลี่ยมากที่สุด 148.0 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร มีความหนาแน่นของปากใบที่ผิวใบด้านบนเฉลี่ยน้อยที่สุด 9.5 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร และมีความหนาแน่นของปากใบที่ผิวใบด้านล่างเฉลี่ยมากที่สุด 378.6 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร มีความหนาแน่นของปากใบที่ผิวใบด้านล่างเฉลี่ยน้อยที่สุด 22.5 ปากใบต่อตารางมิลลิเมตร สอดคล้องกับการศึกษาของ Pant and Mehra (1965) ซึ่งศึกษาพัฒนาการของปากใบในพืชวงศ์เข็ม พบว่าพืชสกุลเข็มขาวส่วนใหญ่มีปากใบที่ผิวใบด้านล่าง (hypostomatic leaf) พบพืช 2 ชนิดที่มีปากใบทั้งสองด้าน (amphistomatic leaf) ได้แก่ *Pavetta edentula* และ *P. zeyheri* และสอดคล้องกับการศึกษาของ วิโรจน์ เกสรบัว (2547) ซึ่งศึกษาพืชสกุลยอ (*Morinda* L.) ในประเทศไทย พบว่ากายวิภาคศาสตร์ของพืชสกุลนี้ มีรูปร่างเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบด้านล่างรูปร่างไม่แน่นอน ปากใบเป็นแบบพาราไซติกส่วนใหญ่พบที่เนื้อเยื่อชั้นคิวไบด้านล่าง

5. สารสะสม จากการศึกษาพบสารสะสมภายในเซลล์ ได้แก่ ผลึกรูปปริซึม ผลึกรูปดาว ผลึกรูปเม็ดทราย ผลึกรูปเข็ม ผลึกรูปแท่ง พบเซลล์เม็ดน้ำมันและเซลล์สะสมสารดีดส์แดงเข้ม วิโรจน์ เกสรบัว (2547) ศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์แผ่นใบของพืชสกุลยอ วงศ์เข็มในประเทศไทย พบสารสะสมผลึกรูปเข็มรวมกันเป็นก้อนหรือเป็นแท่งแคบยาวกระจายประปรายทั่วไปในพืชที่ศึกษา พืชสกุล *Virectaria* ซึ่งศึกษาโดย Dessein et al. (2001) พบว่าพืชสกุลนี้มีผลึกแบบรูปแท่งและรูปดาวกระจายอยู่ประปราย แต่พืชสกุล *Morinda* มีเฉพาะผลึกรูปแท่งเท่านั้น ทั้งนี้พืชที่นำมาศึกษา มีความแตกต่างกันของสภาพแวดล้อมของถิ่นที่อาศัย ทำให้มีผลต่อการมีหรือไม่มีสารสะสมผลึก

การที่พบลักษณะที่มีความแตกต่างกันและพบลักษณะเพิ่มเติมจากที่มีการรายงานไว้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพืชที่นำมาศึกษา มีความแตกต่างกันในด้านชนิดพืชจึงมีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่แตกต่างกัน รวมถึงลักษณะบางประการของพืชบางชนิด อาจมีความแปรผันตามสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาลักษณะกายวิภาคศาสตร์เนื้อเยื่อชั้นคิวไบในครั้งนี้จึงมีความสำคัญต่ออนุกรมวิธานอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการระบุพืชบางชนิดหรือบางสกุลได้ โดยสามารถสร้างรูปวิธานเพื่อใช้ระบุพืชวงศ์เข็มในมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดได้ ดังรูปวิธานต่อไปนี้

รูปวิธานสำหรับการระบุชนิด

1. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบทั้งสองด้านรูปร่างคล้ายกัน.....2
1. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบทั้งสองด้านรูปร่างต่างกัน.....9
2. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบมีรูปร่างไม่แน่นอน.....3
2. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบมีรูปร่างอื่น.....5
3. มีขนเซลล์เดี่ยว.....*Mussaenda philippica*
3. ไม่มีขน.....4
4. มีสารสะสมเป็นผลึกรูปเม็ดทราย.....*Ixora lobbii*
4. มีสารสะสมเป็นเม็ดน้ำมัน.....
.....*Gardenia jasminoides*
5. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบรูปร่างคล้ายจิกชอร์.....6
5. เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นคิวไบรูปร่างหลายเหลี่ยม.....8
6. มีขนเซลล์เดี่ยว.....7
6. มีขนหลายเซลล์.....*Ridsdalea wittii*
7. มีสารสะสมเป็นผลึกรูปปริซึมที่ผิวใบด้านล่าง...
.....*Oldenlandia corymbosa*
7. ไม่มีสารสะสมเป็นผลึกรูปปริซึมที่ผิวใบด้านล่าง

..... <i>Mitracarpus hirtus</i>	14. ไม่มีขน..... <i>Gardenia carinata</i>
8. มีสารสะสมเป็นผลึกรูปเม็ดทราย.....	15. มีผิวเคลือบคิวทินเป็นริ้วเรียงขนาน.....
..... <i>Catunaregam tomentosa</i>16
8. มีสารสะสมเป็นผลึกรูปเข็ม..... <i>Ixora</i>	15. ผิวเคลือบคิวทินเป็นผิวเรียบ.....
<i>chinensis</i> <i>Mitragyna speciosa</i>
9. เนื้อเยื่อชั้นผิวใบมีปากใบทั้งสองด้าน.....10	16. ผิวเคลือบคิวทินเป็นริ้วเรียงขนาน.....
9. เนื้อเยื่อชั้นผิวใบมีปากใบเฉพาะด้านล่าง.....11 <i>Cynanchum pulchellum</i>
10. มีขนเซลล์เดี่ยว..... <i>Spermacoce remota</i>	16. ผิวเคลือบคิวทินเป็นปุ่ม.....17
10. มีขนหลายเซลล์..... <i>Spermacoce latifolia</i>	17. มีขนเซลล์เดี่ยวที่ผิวใบด้านบน.....18
11. มีสารสะสม.....12	17. ไม่มีขนเซลล์เดี่ยวที่ผิวใบด้านบน.....19
11. ไม่มีสารสะสม.....15	18. ขนมีความยาวน้อยกว่า 10 μm
12. มีสารสะสมเป็นเม็ดน้ำมัน.....13 <i>Hedyotis ovatifolia</i>
12. มีสารสะสมเป็นผลึกรูปเม็ดทราย.....	18. ขนมีความยาวมากกว่า 100 μm
..... <i>Morinda citrifolia</i> <i>Hamelia patens</i>
13. ผิวเคลือบคิวทินเป็นริ้วเรียงขนาน.....	19. มีเซลล์สะสมสารติดสีแดงเข้มที่ผิวใบด้านบน.....
..... <i>Morinda pubescens</i> <i>Oldenlandia biflora</i>
13. ผิวเคลือบคิวทินเป็นผิวเรียบ.....14	19. ไม่มีเซลล์สะสมสารติดสีแดงเข้มที่ผิวใบด้านบน..
14. มีขนหลายเซลล์..... <i>Hedyotis pachycarpa</i> <i>Paederia linearis</i>

Table 2 Comparison of characteristics of leaf surface on adaxial side in family Rubiaceae

Scientific name	Epidermal cell			Stomata			Trichome			Cuticular ornamentation	Inclusion		
	Epidermal cell density (cell/mm ²)	Cell shape	Anticlinal wall	Type	Stomatal density (number/mm ²)	SI (%)	Guard cell length (µm)	Type	Length (µm)			Trichome density (number/mm ²)	
													RD
1. <i>Catunaregam tomentosa</i>	663.8±2.71	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	SM	SC	+
2. <i>Cynanchum pulchellum</i>	879.3±2.69	IR	U	-	-	-	-	PT	86.0±0.33	3.2	ST	-	-
3. <i>Gardenia carinata</i>	842.0±3.43	PO	S	-	-	-	-	TU	30.0±2.80	1.4	SM	DC	-
4. <i>G. jasminoides</i>	497.3±1.62	IR	U	-	-	-	-	-	-	-	SM	OI	-
5. <i>Hedyotis pachycarpa</i>	779.7±4.04	IR	U	-	-	-	-	TU	143.2±3.51	142.3	PL	-	-
6. <i>H. ovatifolia</i>	182.7±3.05	PO	S	-	-	-	-	TM	3.0±1.00	3.2	SM	OI	-
7. <i>Hamelia patens</i>	611.0±1.79	PO	U	-	-	-	-	TU	1.6±2.18	1.0	PL	-	-
8. <i>Ixora lobbii</i>	964.0±0.64	IR	U	-	-	-	-	-	-	-	ST	SC	+
9. <i>I. chinensis</i>	908.7±2.21	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	SM	DC, OI	+
10. <i>Mitracarpus hirtus</i>	162.3±2.54	Jl	U	PA	11.7±2.08	6.72	34.5±3.97	TU	15.3±3.23	15.3	PL	OI	-
11. <i>Mitragyna speciosa</i>	967.0±1.52	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	SM	-	-
12. <i>Morinda citrifolia</i>	530.3±1.50	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	SM	RP, SL	-
13. <i>M. pubescens</i>	875.3±5.98	PO	S	-	-	-	-	TU	4.9±0.24	6.8	ST	PR	-
14. <i>Mussaenda philippica</i>	1,139.3±3.03	IR	U	-	-	-	-	TU	440.7±4.24	15.7	SM	-	+
15. <i>Oldenlandia biflora</i>	207.6±2.14	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	PL	-	+
16. <i>O. corymbosa</i>	326.2±1.09	Jl	S	-	-	-	-	TU	9.0±2.08	9.1	PL	-	-
17. <i>Paederia linearis</i>	378.3±2.37	PO	S	-	-	-	-	-	-	-	PL	-	-
18. <i>Rohmannia wittii</i>	622.0±5.71	Jl	U	PA	9.5±3.54	1.50	25.5±1.41	TM	382.3±5.82	11.3	SM	-	+
19. <i>Spermacoce remota</i>	337.7±1.01	PO	S	PA	148.0±4.18	30.47	27.8±4.07	TU	1.18±2.73	1.2	ST	-	+
20. <i>S. latifolia</i>	616.3±2.55	PO	S	PA	54.33±5.02	8.10	23.3±2.84	TM	8.3±1.53	8.5	PL	-	-

Note: - = Epidermal cell shape: IR = irregular shaped, Jl = jigsaw like shaped, PO = polygonal shaped, Anticlinal wall: S = straight, U = undulate, Stomatal type: PA = paracytic, Trichome: TM = multicellular hair, TU = unicellular hair, PT = peltate hair, Cuticular ornamentation: SM = smooth, ST = striated, PL = papillose, Inclusion: PR = prismatic crystal, DC = druse, SC = sand crystal, RP = raphide crystal, SL = styloid crystal, OI = oil body, RD = red staining inclusion cell, (+ = present; - = absent)

Table 3 Comparison of characteristics of leaf surface on abaxial side in family Rubiaceae

Scientific name	Epidermal cell			Stomata			Trichome			Cuticular ornamentation			Inclusion
	Epidermal cell density (cell/mm ²)	Cell shape	Anticlinal wall	Type	Stomatal density (number/mm ²)	SI (%)	Guard cell length (µm)	Type	Length (µm)	Trichome density (number/mm ²)	ornamentation	Type	
1. <i>Catunaregam tomentosa</i>	517.7±3.39	PO	S	PA	360.3±1.13	41.03	24.2±1.61	-	-	-	SM	SC	+
2. <i>Cynanchum pulchellum</i>	696.8±3.75	Jl	U	PA	156.3±1.59	18.32	26.7±1.44	-	-	-	ST	-	-
3. <i>Gardenia carinata</i>	541.6±2.19	IR	U	PA	236.0±4.57	30.35	19.7±2.75	-	-	-	SM	DC, SC, OI	+
4. <i>G. jasminoides</i>	493.6±1.16	IR	U	PA	342.6±1.03	40.97	23.3±2.52	-	-	-	SM	-	-
5. <i>Hedyotis pachycarpa</i>	383.5±6.55	Jl	U	PA	60.8±4.50	13.68	209.0±6.05	TU	107.3±2.77	143.0	SM	-	-
6. <i>H. ovatifolia</i>	124.0±4.33	Jl	U	PA	105.7±1.40	46.02	32.0±4.77	TM	264.5±4.47	6.7	SM	OI	-
7. <i>Hamelia patens</i>	918.7±5.50	IR	S	PA	22.5±1.32	2.40	94.3±6.24	TU	10.7±2.08	10.7	SM	-	-
8. <i>Ixora lobbii</i>	542.6±5.97	IR	U	PA	181.1±9.97	25.02	33.8±3.51	-	-	-	ST	SC	-
9. <i>I. chinensis</i>	581.0±2.82	PO	S	PA	217.6±2.9	27.25	21.7±2.36	TU	23±1.41	1.0	ST	DC, OI	+
10. <i>Mitracarpus hirtus</i>	145.4±2.51	Jl	U	PA	66.5±2.24	31.38	44.6±3.33	TU	9.3±3.51	9.3	SM	-	-
11. <i>Mitragyna speciosa</i>	818.2±1.36	IR	U	PA	177.5±7.21	17.83	32.6±0.63	TU	70.5±3.09	10.3	SM	-	-
12. <i>Morinda citrifolia</i>	399.0±5.65	IR	U	PA	160.3±14.57	32.10	29.5±4.5	-	-	-	SM	SC	-
13. <i>M. pubescens</i>	454.3±3.53	IR	U	PA	216.7±4.04	35.12	24.8±2.47	TU	5.7±0.58	8.8	ST	OI	-
14. <i>Mussaenda philippica</i>	811.3±1.01	IR	U	PA	378.6±4.59	31.82	16.2±2.65	TU	321.3±2.3	21.7	SM	-	+
15. <i>Oldenlandia biflora</i>	212.6±4.23	Jl	U	PA	128.6±3.52	37.69	31.8±1.53	-	-	-	SM	-	-
16. <i>O. corymbosa</i>	456.1±1.70	Jl	U	PA	259.3±4.83	36.25	24.7±2.52	TU	1.7±0.64	1.6	ST	OI, PR, RP	+
17. <i>Paederia linearis</i>	461.3±2.50	IR	S	PA	78.0±3.61	14.46	17.7±1.50	TM	557.3±9.73	2.3	SM	-	-
18. <i>Rothmannia wittii</i>	486.7±2.77	Jl	U	PA	224.3±2.50	31.54	27.5±0.50	TM	498.3±5.08	22.3	SM	-	-
19. <i>Spermacoce remota</i>	343.6±2.84	IR	U	PA	249.5±3.35	42.07	34.7±1.61	TU	1.45±0.84	1.6	ST	PR	+
20. <i>S. latifolia</i>	603.2±1.82	Jl	U	PA	238.3±3.07	28.32	22.6±2.08	TM	9.3±2.52	9.3	SM	-	-

Note: - = Epidermal cell shape : IR = irregular shaped, Jl = jigsaw like shaped, PO = polygonal shaped, **Anticlinal wall** : S = straight, U = undulate, **Stomatal type** : PA = paracytic, **Trichome** : TM = multicellular hair, TU = unicellular hair, PT = peltate hair, **Cuticular ornamentation** : SM = smooth, ST = striated, **Cell inclusion** : PR = prismatic crystal, DC = druse, SC = sand crystal, RP = raphide crystal, OI = oil body, RD = red staining inclusion cell, (+ = present; - = absent)

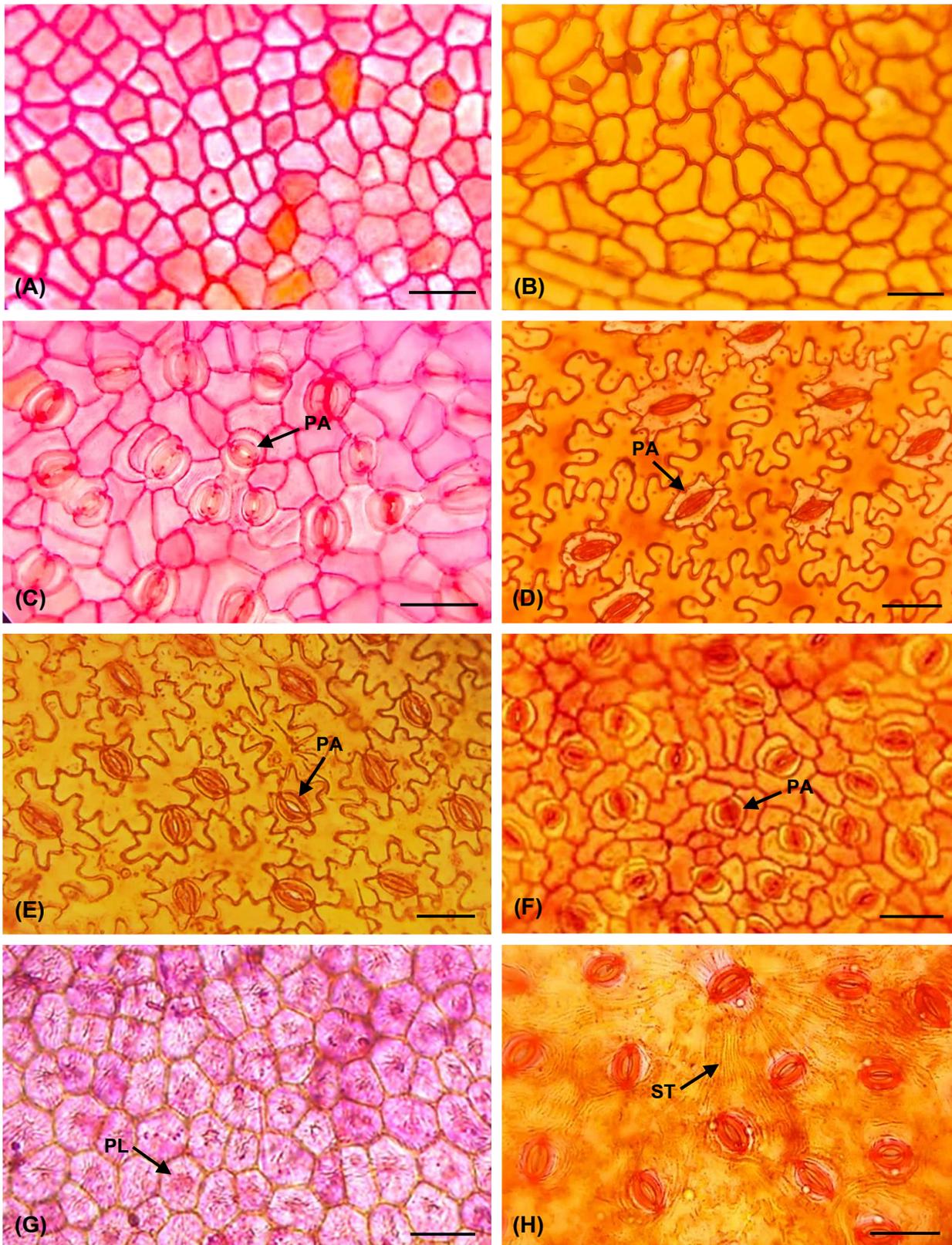


Figure 1 Leaf epidermal anatomy of the family Rubiaceae. (A) Polygonal shaped cells on adaxial surface of *Ixora chinensis*. (B) Irregular shaped cells on adaxial surface of *Ixora lobbii*. (C) Paracytic stomata on abaxial surface of *Ixora chinensis*, (D) *Oldenlandia biflora*, (E) *Oldenlandia corymbosa*, (F) *Gardenia carinata*. (G) Papillose cuticle on adaxial surface of *Hamelia patens*. and (H) Striated cuticle on abaxial surface of *Cynanchum pulchellum*. scale bar = 50 μm . PA = Paracytic stomata, PL = Papillose cuticle, ST = Striated cuticle.

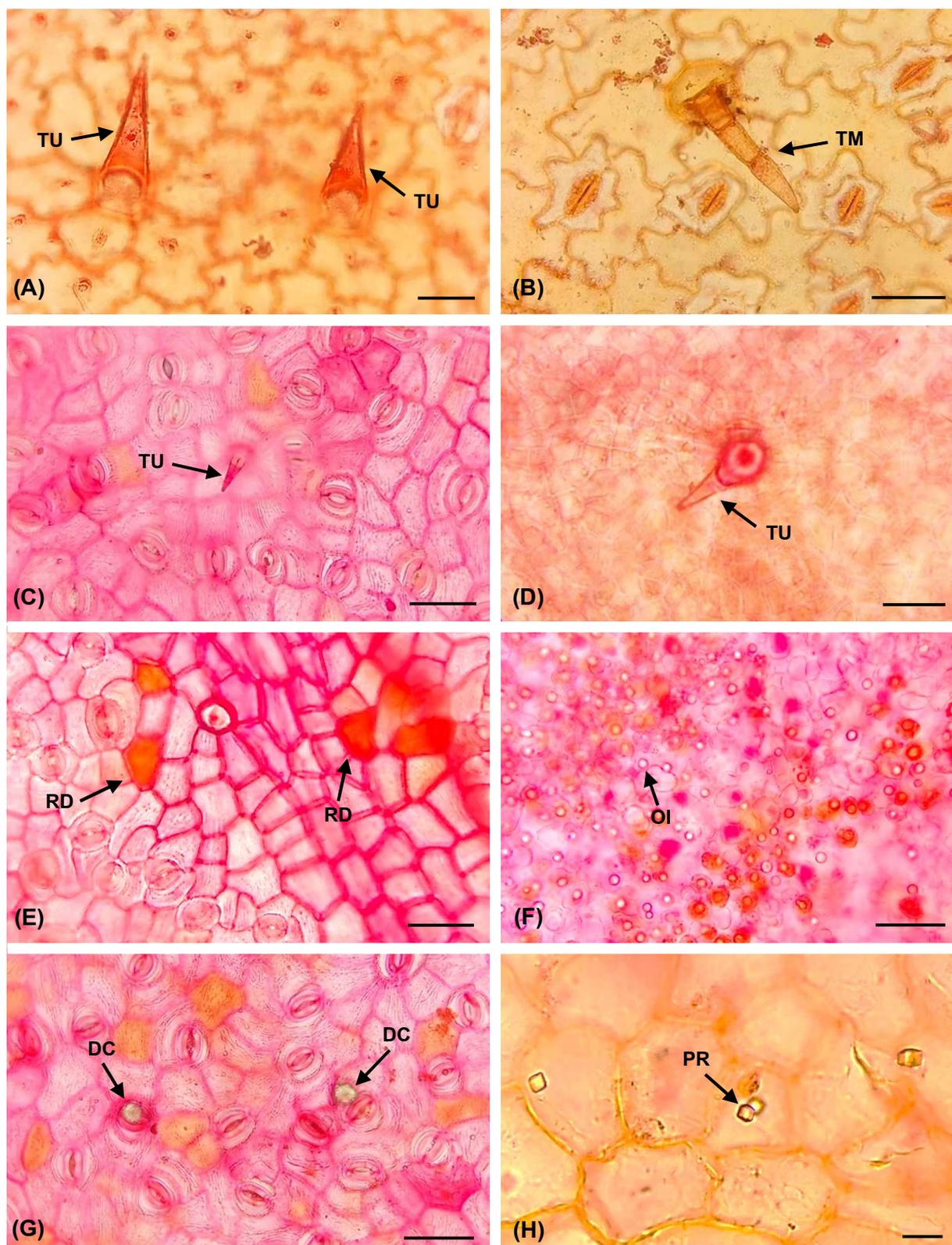


Figure 2 Leaf epidermal anatomy of the family Rubiaceae. (A) Unicellular trichomes on adaxial surface of *Mitracarpus hirtus*. (B) Multicellular trichomes on abaxial surface of *Hedyotis ovatifolia*. (C) Unicellular trichomes on abaxial surface of *Ixora chinensis*. (D) Unicellular trichomes on adaxial surface of *Gardenia carinata*. (E) Red staining inclusion cell, (F) Oil body, (E) Druse crystals on abaxial surface of *Ixora chinensis*. and (H) Prismatic crystal on adaxial surface of *Morinda pubescens*. scale bar = 50 μ m. DC = Druse crystal, OI = Oil body, PR = Prismatic crystal, RD = Red staining inclusion cell, TM = Multicellular hair, TU = Unicellular hair.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- จำลอง เพ็งคล้าย, จรัส จ. เจริญผล, ลีนา ผู้พัฒนพงศ์ และธวัชชัย สันติสุข. (2518). *ไม่มีค่าทางเศรษฐกิจไทย ตอนที่ 1*. โรงพิมพ์สำนักทำเนียบนายกรัฐมนตรี.
- ปริมประภา ภู่งสี. (2561). *กายวิภาคศาสตร์เปรียบเทียบพืชสกุลหญ้าอ้อยดำ (วงศ์เข็ม) ในประเทศไทย* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม].
- วิโรจน์ เกสรบัว. (2547). *พืชสกุลยอ (Morinda L.) ในประเทศไทย* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น].
- สุรินทร์ แข่งขัน, ดวงใจ สุขเฉลิม และสุวิทย์ แสงทองพราว. (2555). การศึกษาอนุกรมวิธานของพืชวงศ์เข็ม ในบางพื้นที่ของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา. *วารสารวิจัยพืชเขตร้อน*, 5, 64–79.
- อุไรวรรณ กุลิช่วย. (2554). *พืชมีขนที่สำรวจพบในบริเวณแอ่งน้ำอำเภอดงใหญ่ จังหวัดสงขลา เพื่อสนับสนุนนิติวิทยาศาสตร์* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์].
- Dessein, S. J., Huysmans, S., Robbrecht, E., & Smets, E. (2001). A morphological and anatomical survey of *Virectaria* (African Rubiaceae), with a discussion of its taxonomic position. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 137, 1–29.
- Dickison, W. C. (2000). *Integrative plant anatomy*. Academic Press.
- Gardner, P. T., Tamsin, T. C., White, A. C., McPhail, D. B., & Duthie, G. D. (2000). The relative contributions of vitamin C, carotenoids and phenolics to the antioxidant potential of fruit juices. *Food Chemistry*, 68, 471–474.
- Jones, S. B., Jr., & Luchsinger, A. E. (1987). *Plant systematics* (2nd ed.). McGraw-Hill
- Mabberley, J. F. (1997). *The plant-book: A portable dictionary of the higher plants*. Cambridge University Press.
- Metcalf, C. R., & Chalk, L. (1950). *Anatomy of the dicotyledons* (Vol. 1). Clarendon Press.
- Metcalf, C. R., & Chalk, L. (1957). *Anatomy of the dicotyledons* (Vol. 1). Oxford University Press.
- Pant, D. D., & Mehra, B. (1965). Ontogeny of stomata in some Rubiaceae. *Phytomorphology*, 15, 300–310.
- Puff, C., Chayamarit, K., & Chamchumroon, V. (2005). *Rubiaceae of Thailand: A pictorial guide to indigenous and cultivated genera*. The Forest Herbarium, National Park, Wildlife and Plant Conservation Department.
- Puff, C., Chayamarit, K., Chamchumroon, V., & Esser, H. J. (2021). Rubiaceae (Genera 1–45). In K. Chayamarit & H. Balslev (Eds.), *Flora of Thailand* (Vol. 15, Part 1, pp. 1–235). Prachachon.
- Salisbury, E. J. (1927). On cause and ecological significance of stomata frequency with special reference to woodland flora. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
- Stace, C. A. (1965). Cuticular studies as an aid to plant taxonomy. *The Bulletin of the British Museum (Natural History)*, 4, 37–40.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว

Development of skin serum products from tangor extract (*Citrus nobilis* Lour)

แสงสิทธิ์ กฤษฏี¹, ชัมย์พร บุญสมภาร^{1*}, เจนจิรา แสนบุรี¹, สิริภรณ์ อัสวปัญญาพร¹, สลิลทิพย์ กุลศิลารักษ์¹ และ อนงค์นุช ทุมปัต¹

Saengsit Kritsadee¹, Chamiporn Boonsomparn¹, Janejira Sanburee¹, Siriparas Assavapanyaporn¹, Salinthip Kunsilarak¹ and Anongnooch Thumpad¹

Received: 18 November 2024 ; Revised: 10 January 2025 ; Accepted: 27 June 2025

บทคัดย่อ

ส้มแก้วเป็นพืชท้องถิ่นที่บ่งชี้ทางภูมิศาสตร์จังหวัดสมุทรสงคราม มีความโดดเด่นมีเปลือกผลหนากว่าส้มทั่วไป และปัจจุบันผลิตภัณฑ์บำรุงผิวหน้าเป็นที่นิยมอย่างมากโดยเฉพาะรูปแบบเซรั่ม วัตถุประสงค์: เพื่อพัฒนาเซรั่มจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้วและศึกษาประสิทธิภาพด้านความชุ่มชื้นของผิว วิธีการศึกษา: สกัดสารสำคัญจากเปลือกผลส้มแก้วด้วยเอทานอลเป็นเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน พบว่าเปลือกผลส้มแก้วมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH นำมาพัฒนาเป็นเซรั่ม 3 สูตร ทดสอบความคงตัวในสภาวะเร่ง 7 รอบ ที่อุณหภูมิ 5 และ 45 องศาเซลเซียส ทดสอบความปลอดภัย และศึกษาด้านความชุ่มชื้นของผิวหน้า เครื่อง Corneometer ก่อนหลังใช้ 28 วัน ของการใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้าจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว สถิติที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ ร้อยละค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่า P-value การทดสอบสถิติ paired-sample t-test และ ผลการศึกษา: สารสกัดจากเปลือกส้มแก้วมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีค่า EC₅₀ เท่ากับ 0.17 mg/mL สารมาตรฐาน BHT มีค่า EC₅₀ เท่ากับ 0.01 mg/ml ผลการทดสอบความคงตัวพบว่าเซรั่ม สูตร 3 มีสีเหลืองใส ความเป็นกรด-ด่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื้อเซรั่มไม่มีการแยกชั้น และพบว่าหลังการใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มบำรุงผิวหน้า สูตร 3 ระยะเวลา 28 วัน มีค่าเฉลี่ยความชุ่มชื้นอยู่ที่ 46.702±12.003 ของความชุ่มชื้น P < 0.05 สรุป: เซรั่มจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว สูตรที่ 3 มีความคงตัวทางกายภาพและเคมี และมีผลการให้ความชุ่มชื้นที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถนำไปใช้พัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อบำรุงผิวได้ต่อไป

คำสำคัญ: ส้มแก้ว, เซรั่ม, ความชุ่มชื้นผิวหน้า

Abstract

Tangor (*Citrus nobilis* Lour), locally known as “Som Kaew,” is a Geographical Indication (GI) plant of Samut Songkhram Province, characterized by a thicker peel than common oranges. Currently, facial skin care products, particularly in the form of serums, are highly popular. Objective: To develop a serum from Tangor peel extract and evaluate its effectiveness in moisturizing the skin. Methods: Key substances were extracted from Tangor peels using ethanol for 7 days and concentrated via a rotary evaporator. The antioxidant activity of the extract was assessed using the DPPH method. The extract was formulated into three serum recipes. Stability was tested through 7 heating-cooling cycles at 5°C and 45°C. Safety was evaluated using a skin patch test, and skin moisturizing efficacy was measured using a Corneometer before and after 28 days of use. Statistical analysis included percentage, mean, standard deviation, and paired-sample t-test. Results: The Tangor peel extract exhibited antioxidant activity with an EC₅₀ value of 0.17 mg/mL, compared to 0.01 mg/mL for the BHT standard. Stability tests revealed that Serum Formula 3 remained a clear

¹ สาขาวิชาการแพทย์แผนไทยประยุกต์, วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา วิทยาเขตสมุทรสงคราม 75000

¹ Department of Applied Thai Traditional Medicine, College of Allied Health Sciences, Suan Sunandha Rajabhat University, Samut Songkhram Campus 75000

* Corresponding author, e-mail: chamiporn.bo@ssru.ac.th

yellow liquid with no significant change in pH and no phase separation. After 28 days of using Serum Formula 3, the average skin moisture level was 46.702 ± 12.003 ($p < 0.05$). Conclusion: The serum containing Tangor peel extract (Formula 3) demonstrated physical and chemical stability and provided the highest moisturizing effect. It has the potential to be developed into effective skin care products.

Keywords: Tangor, serum, moisturized skin

บทนำ

ส้มแก้ว พืชพื้นเมืองจังหวัดสมุทรสงคราม มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Citrus nobilis* Lour วงศ์ Rutaceae ซึ่งเป็นพืชมีถิ่นกำเนิดในแถบมาลาเย แล้วจึงแพร่หลายไปยังประเทศต่าง ๆ โดยในประเทศไทยพบได้ในพื้นที่จังหวัดสมุทรสงคราม มีชื่อเรียกว่า ส้มคิง (ทิพย์พรรณ สดากร, 2002), คิงแมนดาริน (King mandarin) หรือ แทงกอร์ส (tangors or king orange) รวมถึง ส้มแก้ว ส้มแก้งกลาย ส้มมะแฉะ มีชื่อเรียกในไทยอีกชื่อว่า King of Siam เป็นลูกผสมแบบธรรมชาติระหว่างส้มเปลือกอ่อนและส้มเกลี้ยงหวาน มีลักษณะเด่นของสายพันธุ์ คือเป็นพันธุ์ส้มเปลือกอ่อนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เปลือกผลมีลักษณะหยาบและค่อนข้างหนา ผิวเปลือกผลและเนื้อมีสีเหลืองเข้มหรือส้มอ่อน ผลแก่ตอนช่วงปลายฤดู ส่วนของเมล็ดสามารถทนต่อสภาพอากาศร้อนได้ เนื้อส้มมีรสชาติคล้ายส้มเขียวหวาน แต่หวานฉ่ำและเนื้อหนากว่า เมื่อผลสุกจะมีสีทองสวยงาม เป็นส้มที่มีขนาดใหญ่รองจากส้มโอ เป็นไม้ยืนต้น ใบเรียบ มีต่อมน้ำมัน ผลรูปร่างกลมแป้น ใหญ่ เปลือกนอกสีส้ม เปลือกอ่อน แกะง่าย ใช้ทำน้ำส้มคั้น และเป็นผลไม้เช่นไหวในช่วงเทศกาลตรุษจีน ส้มแก้วกลับลดจำนวนน้อยลงทุกปี เนื่องจากเป็นพืชที่ดูแลยาก และออกผลเพียงปีละครั้ง (Hongwiwat & Hongwiwat, 2007) ในส้มทั่วไปนั้นตามตำราการแพทย์แผนไทย และน้ำมันหอมระเหยจากพืชตระกูลส้ม ส่วนใหญ่จะได้จากเปลือกส้ม มีน้ำมันหอมระเหยช่วยให้สดชื่น ผ่อนคลาย คลายเครียด มีฤทธิ์ต่อระบบประสาท ระบบหัวใจและหลอดเลือด ระบบหายใจ รวมไปถึงต่อการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติ ต่ออารมณ์และความรู้สึก (Kritsadee *et al.*, 2023)

มีการศึกษาพบว่าเปลือกผลส้มมีสารสำคัญ flavonoids, limonoids, and carotenoids ซึ่งเป็นสารที่ช่วยปกป้องผิวจากการเกิดอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ และเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิว นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันแสงแดดได้ด้วย (Jaiswal & Gaur, 2023)

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์บำรุงผิวหน้าที่นิยมในประเทศไทยเป็นรูปแบบเซรั่ม ประกอบด้วยซิลิโคน น้ำ และสารประสานซิลิโคนกับน้ำ ลักษณะเนื้อผลิตภัณฑ์จะคล้ายกับเจลที่สามารถระเหยไว การซึมลงสู่ผิวหนึ่งใกล้เคียงกับเจลเหมาะสำหรับคน

ผิวแห้ง ผิวธรรมดาและผิวมัน ซึ่งเหมาะสมกับสภาพผิวและภูมิอากาศของไทย ทำให้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบเซรั่มเป็นที่นิยมในประเทศไทยและประเทศเขตร้อนชื้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางเติบโตมาตั้งแต่ปี (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2023) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี ประกอบกับผู้บริโภคในยุคใหม่นิยมใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมมาจากธรรมชาติ ซึ่งไทยเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่มีความหลากหลายทางชีวภาพมาก ทำให้มีพืชสมุนไพรมากมายที่สร้างนำมาสร้างมูลค่าเพิ่ม อีกทั้งยังกระตุ้นเศรษฐกิจให้กับประเทศได้อีกทางหนึ่งด้วย

คณะผู้วิจัย จึงมีความประสงค์ที่จะส่งเสริมอนุรักษ์พืชที่เป็นอัตลักษณ์ท้องถิ่นจังหวัดสมุทรสงคราม จึงได้ศึกษาถึงสรรพคุณของส้มแก้ว โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกผลส้มแก้ว เพื่อพัฒนาเป็นเซรั่มที่มีส่วนผสมจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว และศึกษาประสิทธิภาพด้านความชุ่มชื้นของผิวหนึ่งในอนาคตจากการใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มที่มีส่วนผสมจากสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว



Figure 1 Tangor (King mandarin or King orange)

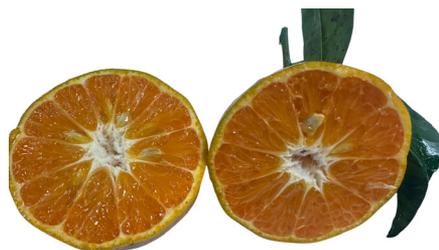


Figure 2 This shows the inside of Tangor

การทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างและการสกัดเปลือกผลส้มแก้ว

เก็บตัวอย่างส้มแก้วจากพื้นที่เพาะปลูก ต.บางสะแก อ.บางคนที จ.สมุทรสงคราม นำมาล้างทำความสะอาด ลอกเปลือกออกตากในที่ร่มให้แห้ง แล้วนำไปอบต่อในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปบดเป็นผง นำผงเปลือกผลส้มแก้วน้ำหนัก 500 กรัม ใช้วิธีการแช่สกัดด้วยแอลกอฮอล์ 70% อัตราส่วน 1:1 (โดยปริมาตร) เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (ทำการคนทุกวัน) เมื่อครบกำหนดนำไปกรองแยกส่วนน้ำและกากออกด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แล้วนำสารสกัดที่ได้มาระเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเพื่อรักษาองค์ประกอบ (Abd El-Aziz *et al.*, 2024)

แล้วทำให้แห้งด้วยการนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกว่าสารสกัดจะแห้ง แล้วนำสารสกัดที่แห้งดีแล้วเก็บไว้ในขวดปิดฝาให้สนิทและเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น -20 องศาเซลเซียส และคำนวณ % Yield ตามสูตรคำนวณ ดังนี้

ร้อยละของปริมาณสิ่งสกัดสุทธิ (% Yield) = [ปริมาณสิ่งสกัดที่ได้ (กรัม) / น้ำหนักตั้งต้นของตัวอย่างที่ศึกษา (กรัม)] x 100

2. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH radicals scavenging assay

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging capacity (DPPH) โดยใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระที่คงตัวและมีสีม่วง เมื่อ DPPH ทำปฏิกิริยากับสารต้านออกซิเดชันที่ละลายด้วยเอทานอล จะทำให้สีม่วงจางลงจนเป็นสีเหลือง

การเตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.05 mM

- ชั่ง DPPH 2.4 mg ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 100 ml เติมน้ำเอทานอลเข้าให้เข้ากัน และปรับปริมาตรจนถึงขีดที่กำหนด

- เตรียมสารละลายมาตรฐาน BHT 5 ความเข้มข้น (1.25 – 20 µg/ml)

- เตรียมสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว 5 ความเข้มข้น (62.5 - 500 µg/mL)

3. การตรวจวัดคุณสมบัติของสารมาตรฐานและสารสกัดสมุนไพร

- เติมน้ำสารละลายมาตรฐาน และสารละลายสารสกัดสมุนไพร ลงใน 96 well plate จำนวน 100 µl

- เติมน้ำสารละลาย DPPH radical ลงในหลุมที่มีสารมาตรฐาน และสารละลายสารสกัดสมุนไพร จำนวน 100 µl

- เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที

- วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 nm

- ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

- นำค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณ % inhibition จากสมการ

$$\% \text{ Inhibition } (\%) = \frac{\text{Control OD} - \text{Sample OD}}{\text{Control OD}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ Control OD คือ ค่าดูดกลืนแสงของ DPPH และตัวทำละลายที่ใช้

และ Sample OD คือ ค่าดูดกลืนแสงของสารสกัดที่ผสมกับ DPPH

จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของ % Inhibition (%) ในแต่ละความเข้มข้นไปหาค่า EC₅₀ โดยใช้โปรแกรม GraphPad Prism

4. การพัฒนาสูตรครีม 3 สูตร

ตาม Table 1 โดยสูตร 1 จะเป็นสูตรพื้นฐานซึ่งยังไม่ใส่สารสำคัญหรือสารสกัด active ingredients ลงไป ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานดังนี้ Phenoxyethanol, Aloe Vera Extract, Xanthan Gum, Double Hyaluron Liquid, Niacinamide, Polyglycerin-10, Moist 24, Acetyl Glucosamine, Witch Hazel plus Allantoin, Galactomyces Ferment Filtrate, Tocopheryl Acetate, Water และในสูตรที่ 2, 3 จะเพิ่มสารสำคัญหรือสารสกัดลงไปอัตราส่วนร้อยละ 2.5 และ 5 ตามลำดับ

วิธีการเตรียมครีม โดย Xanthan Gum ไปละลายกับ Polyglycerin-10 แล้วนำไปผสมกับ Tocopheryl Acetate Water-Soluble แล้วพักไว้ Niacinamide, GlucoBright™ (Acetyl Glucosamine), Phenoxyethanol ไปละลายกับ Water แล้วพักไว้ นำ Water ที่เหลือขึ้นให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส Aloe Vera Extract, Double Hyaluron Liquid, Moist 24 หลังจากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำส่วนที่พักไว้ลงไป แล้วปรับอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส แล้วจากนั้นจึงเติม Witch Hazel plus Allantoin, Galactomyces Ferment Filtrate (Pitera) จะได้เป็นครีมสูตรพื้นฐาน ในสูตรที่ 2, 3 จะใส่สารสกัดส้มแก้วในอัตราส่วนตาม Table 1

Table 1 The formula skin serum products 3 formula

Ingredient	Formula	Formula	Formula
	1 (Base) percentage	2 percentage	3 percentage
Tangor Extract	-	2.5	2
Phenoxyethanol	0.5	0.5	0.5
Aloe Vera Extract	1	1	1
Xanthan Gum	1	1	1
Sodium Hyaluronate, Water Preserved by Phenoxyethanol 0.8%	2	2	2
Niacinamide	1	1	1
Polyglycerin-10	2	2	2
Glycereth-26	4	4	4
Acetyl Glucosamine	2	2	2
Witch Hazel plus	1	1	1
Allantoin			
Galactomyces Ferment Filtrate	3	3	3
Tocopheryl Acetate	1	1	1
Water	81.5	79	79.5
Total	100	100	100

5. การทดสอบความคงตัวของทางกายภาพและทางเคมี

การทดสอบความคงตัวของสภาวะเร่ง โดยการเร่งด้วยอุณหภูมิ (Heating-cooling cycle) โดยนำเซรั่มทั้ง 3 สูตร ใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาใส่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบ สลับกันเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 7 รอบ แล้วนำมาประเมินค่าความเป็นกรด-ด่าง pH โดยใช้ pH meter สังเกตสีและการแยกชั้น

6. การทดสอบความปลอดภัยด้วยการใช้ผลิตภัณฑ์เซรั่มจากสารสกัดเปลือกส้มแก้วด้วยวิธี skin patch test

ให้อาสาสมัครทาเซรั่ม สูตร 1 และ 3 ในปริมาณ 0.25 กรัม/สูตร ที่ท้องแขนของอาสาสมัครสุขภาพดี จำนวน 6 คน บนพื้นที่ผิว 2x2 ตารางเซนติเมตร ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วปิดทับบริเวณที่ทาด้วยผ้าก๊อซและพลาสติกชนิดกันน้ำ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ต้องล้างออก แล้วประเมินผลการแพ้โดยการสังเกตลักษณะผิวหนังด้วยตาเปล่าเป็นเวลา 30 นาทีหลังแกะผ้าออกโดยพิจารณาตามเกณฑ์การพิจารณาความระคายเคืองของผลิตภัณฑ์ต่อผิวหนัง โดยค่าระดับคะแนน ได้แก่ 0 = ไม่เกิดการระคายเคือง , 0.5 = ผื่นแดงเล็กน้อย หรือมีจุดแดงกระจายเล็กน้อย , 1 = ผิวหนังแดง ,

2 = ผิวหนังแดงชัดเจนร่วมกับอาการบวมของผิวหนังและมีหรือไม่มีตุ่มน้ำ , 3 = ผิวหนังแดงรุนแรงร่วมกับอาการบวม น้ำรุนแรงและมีหรือไม่มีตุ่มน้ำ

7. การศึกษาประสิทธิภาพด้านความชุ่มชื้นของผิวหนัง

ทาเซรั่มที่ท้องแขน ปริมาณ 0.25 กรัมต่อสูตร ในพื้นที่ผิวหนังขนาด 3x3 เซนติเมตร วันละ 2 ครั้ง ติดต่อกัน 14 วัน ในอาสาสมัครสุขภาพดีจำนวน 50 คน เป็นเพศชาย 25 คน และเพศหญิง 25 คน อายุระหว่าง 20 - 25 ปี วัดความชุ่มชื้นผิวหนังก่อนและหลังทาเซรั่ม ในระหว่างการทดลองไม่อนุญาตให้อาสาสมัครใช้เครื่องสำอางทุกชนิดบริเวณที่ทดสอบ และประเมินผลการทดสอบด้วยเครื่องตรวจวัดความชุ่มชื้นผิว (Corneometer) probe corneometer cm 825

การวัดปริมาณความชุ่มชื้นของผิวหนังนี้ใช้หลักการความสามารถประจุไฟฟ้า โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าของผิวหนังบริเวณท้องแขน วัดค่าในสภาวะอุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 40 ในผิวแห้ง ผิวธรรมดา และผิวมัน คือ <35 , 35-50 , >50 ตามลำดับ โดยการวัดใช้เวลาในการวัดสั้น ใช้เวลา 1 วินาทีต่อการวัด 1 ครั้ง หลังจากนั้นวัดซ้ำที่ผิวหนังบริเวณเดิมโดยเว้นระยะเวลาห่างกัน 5 วินาที ทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง

เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง

- เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเข้าร่วมการศึกษา
1. อาสาสมัครเข้าร่วมโครงการด้วยความสมัครใจ และลงนามในเอกสารยินยอมโดยได้รับการบอกกล่าวอย่างเต็มที่
 2. เป็นผู้มีสุขภาพแข็งแรง ไม่มีโรคประจำตัว ไม่มีโรคแทรกซ้อนเฉพาะโรคที่เกี่ยวกับทางเดินหายใจส่วนบน มีค่าดัชนีมวลกายอยู่ในระดับปกติไม่เกิน 23.00
 3. มีสัญญาณชีพอยู่ในระดับปกติ อาสาสมัครจะต้องมีค่าความดันโลหิตตัวบนน้อยกว่า 140 มิลลิเมตรปรอท และค่าความดันโลหิตตัวล่าง น้อยกว่า 90 มิลลิเมตรปรอท อัตราการเต้นของหัวใจมีค่าระหว่าง 60-100 ครั้ง/นาที และอัตราการหายใจมีค่าระหว่าง 16-20 ครั้ง/นาที

เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างออก

1. อาสาสมัครต้องไม่มีประวัติการแพ้ยาหรือแพ้ผิวหนัง หรือแพ้ยาหรือแพ้ผิวหนัง
2. อาสาสมัครต้องไม่มีประวัติแพ้ยาหรือแพ้ผิวหนัง

เกณฑ์การถอนอาสาสมัครออกจากการวิจัย (Withdrawal/ Discontinuation criteria)

1. กลุ่มตัวอย่างขอถอนตัวออกจากการศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จำนวนของการทดสอบ $n = 50$ การใช้สถิติเชิงพรรณนา โดยใช้ค่าสถิติแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต การกระจายข้อมูล และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการใช้เซรั่ม ของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้สถิติ paired-sample t-test

การพิทักษ์สิทธิ์กลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เลขที่ COA.1-068/2023 หลังจากนั้นผู้วิจัยเข้าพบกลุ่มตัวอย่าง แนะนำตัว ชี้แจงวัตถุประสงค์ของการวิจัยและให้ตัดสินใจเข้าร่วมการวิจัยโดยอิสระ ทั้งนี้สามารถถอนตัว หรือยกเลิกการให้ข้อมูลได้ตลอดเวลา ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยจะเก็บเป็นความลับ และนำเสนอในภาพรวมเท่านั้น

ผลการศึกษา

สารสกัดหยาบของเปลือกผลส้มแก้ว น้ำหนัก 500 กรัม โดยวิธีการหมัก (maceration) ด้วยแอลกอฮอล์ 70% และนำไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary evaporator) ได้ปริมาณสารสกัดหยาบของเปลือกผลส้มแก้ว เท่ากับ 80.20 กรัม จากนั้นคำนวณหาร้อยละผลผลิตของสารสกัดหยาบต่อน้ำหนักของพืชสมุนไพรตัวอย่าง (% yield) ของสารสกัดจากเปลือกผลส้มแก้ว เท่ากับ 16.04 กรัม

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH radicals scavenging assay ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเปลือกส้มแก้ว ด้วยตัวทำละลายเอทานอล และสารมาตรฐาน BHT พบว่า สารสกัดเปลือกส้มแก้วมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.17 ± 0.006 mg/mL สารมาตรฐาน BHT มีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.01 ± 0.005 mg/ml

Table 2 EC_{50} values of DPPH radical scavenging activity

Extract	EC_{50} values of DPPH radical scavenging activity (mg/ml)
Tangor Extract	0.17 ± 0.006
BHT	0.01 ± 0.005

การทดสอบความคงตัวของทางกายภาพและทางเคมี โดยนำเซรั่มทั้ง 3 สูตร การเร่งด้วยอุณหภูมิ (Heating-cooling cycle) ใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาใส่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบ สลับกันเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบ 7 รอบ พบว่า สูตร 1 และ 3 เป็นสูตรที่ดีที่สุดในการทดสอบ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพโดยมีสีเหลืองใส เนื้อเซรั่มไม่มีการแยกชั้น ส่วนสูตร 2 มีการเปลี่ยนสีเล็กน้อยเป็นสีเหลืองเข้ม ผลการทดสอบความเป็นกรดต่าง พบว่า หลังการทดสอบความคงตัวของทางกายภาพและทางเคมี เซรั่ม สูตร 2 มีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตามตารางที่ 2 ทำให้เห็นได้ว่าเซรั่มทั้ง 3 สูตร อยู่ในสภาวะคงที่ที่เหมาะสมที่จะนำไปทดสอบที่ผิวหนังต่อไป ซึ่งกำหนดอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 4 ถึง 45 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์

Table 3 Potential of Hydrogen ion (pH)

Potential of Hydrogen ion (pH)	Before	After
Formula 1	4.514 ± 0.058	4.513 ± 0.060
Formula 2	4.490 ± 0.092	4.431 ± 0.081
Formula 3	4.513 ± 0.038	4.512 ± 0.059

ผลการทดสอบความปลอดภัย หลังจากอาสาสมัครเข้ารับการทดสอบความปลอดภัยด้วยวิธี skin patch test เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า อาสาสมัครที่ทำเซรั่ม ร้อยละ 100 ไม่พบอาการผื่นแพ้บริเวณผิวหนังที่ทำเซรั่มแต่อย่างใดต่ออาสาสมัคร ทำให้เชื่อได้ว่า เซรั่มทั้ง 3 สูตรนี้มีความปลอดภัยที่ไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังของอาสาสมัคร

ผลการวัดด้านความชุ่มชื้นของผิวหนัง ด้วยเครื่อง Corneometer CM 825 การวัดปริมาณความชุ่มชื้นของผิวหนังนี้ใช้หลักการความสามารถประจุไฟฟ้าได้เป็นพื้นฐาน โดยผู้วิจัยเลือกเซรั่มสูตร 1 และ 3 ในการทดสอบ ซึ่งหลังจากการทำเซรั่ม สูตร 1 และ 3 ที่ห้องแล็บ ปริมาณ 0.25 กรัมต่อสูตร ในพื้นที่ผิวหนังขนาด 3×3 เซนติเมตร วันละ 2 ครั้ง ติดต่อกัน 28 วัน ในอาสาสมัครสุขภาพดีจำนวน 50 คน พบว่า เซรั่มสูตร 3 มีค่าเฉลี่ยของค่าความจุไฟฟ้าผิวหนังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตาม Table 4

Table 4 The skin hydration was measured as skin capacitance by using Corneometer CM 825

Capacitance	Before	After	P-value
Formula 1	39.817±10.123	41.824±10.696	0.062
Formula 3	39.817±10.123	46.702±12.003	0.000

และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่าง หลังการใช้ เซรั่มสูตร 1 และ 3 พบว่า ค่าความจุไฟฟ้าผิวหนัง เท่ากับ 41.824±10.696 และ 46.702±12.003 ซึ่งมีความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ P-value = 0.000

จึงเป็นข้อสรุปได้ว่าเซรั่ม สูตร 3 ที่มีส่วนผสมของสารสกัดเปลือกผลส้มแก้วนั้น ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวหนังของอาสาสมัครได้

อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

ส้มแก้วพืชท้องถิ่นจังหวัดสมุทรสงคราม เป็นพืชท้องถิ่นที่เป็นอัตลักษณ์ของจังหวัด โดยมีการศึกษาวิจัยในประเทศไทย และต่างประเทศน้อยมาก ซึ่งควรนำมาศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของท้องถิ่น โดยผลงานวิจัยนี้ทำให้เห็นว่า ส้มแก้ว มีสรรพคุณที่ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้ผิวหนัง ซึ่งผลการใช้เซรั่มที่มีส่วนผสมของสารสกัดเปลือกผลส้มแก้ว มีสรรพคุณช่วยให้ผิวหนังมีความชุ่มชื้นในอาสาสมัคร และผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเนื้อเซรั่มที่ซึมเข้าผิวได้เร็วยังช่วยให้การทำงานของอาสาสมัคร และยังสอดคล้องกับ ฐาปนีย์ หงส์รัตนาวรกิจ ที่ศึกษาพัฒนาสูตรตำรับครีมทาผิวที่ส่วนผสมของน้ำมันหอมระเหยของพืชตระกูลส้ม (Hongratanaworakit, 2005) และในการเลือกพัฒนาผลิตภัณฑ์บำรุงผิวในรูปแบบเซรั่ม เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่มีความเข้มข้นของสารเพิ่มประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์บำรุงผิวอื่น (Nilsuwankosit *et al.*, 2014)

ซึ่งจากผลการทดสอบนี้จะเห็นได้ว่า เซรั่มที่มีส่วนผสมของสารสกัดเปลือกส้มแก้วช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวหนัง ซึ่งในเปลือกผลส้มแก้วมีสาร Hesperidin กลุ่มฟลาโวนอยด์ ที่มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ (Jaiswal & Gaur, 2023)

การศึกษาครั้งนี้ ทำให้เห็นได้ว่าการใช้ประโยชน์ของเปลือกผลส้มแก้ว ที่นอกจากจะนำไปกลั่นน้ำมันหอมระเหย (Kritsadee *et al.*, 2022) แล้วยังสามารถนำไปสกัดเพื่อนำสารสำคัญที่ได้ไปใช้ในการบำรุงผิวที่ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวหนัง (Potaros *et al.*, 2021) ซึ่งจะสามารถต่อยอดไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องควรเพิ่มเติมการศึกษาในด้านอื่น ๆ เพิ่ม เช่น การศึกษาสารพฤกษเคมีเบื้องต้น การศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพ การศึกษาความเป็นพิษรวมไปถึงการหาปริมาณสารสำคัญในกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ เพื่อให้การศึกษาพัฒนาสั้มแก้วเกิดประโยชน์สูงสุดให้กับประเทศและประชาชน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ สาขาวิชาการแพทย์แผนไทยประยุกต์ วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา วิทยาเขตสมุทรสงคราม ที่ให้ความสนับสนุนจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. (2023). *รายงานตลาดเชิงลึกสำหรับสินค้าสุขภาพและความงาม*. สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครนิวยอร์ก. <https://www.ditp.go.th/post/154858>
- ทิพย์พรรณ สดการ. (2002). *รายชื้อผัก ผลไม้และพืชไร่ ในประเทศไทย*. กองพิษศาสตร์และเวชพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- Abd El-Aziz, N. M., Mehany, T., & Shehata, M. G. (2024). Characterization of orange peel extract-cross linking whey protein nanoparticles and their influences on the physical and sensory properties of orange juice. *LWT – Food Science and Technology*, 208, 116668.
- Hongratanaworakit, T. (2005). *Formulation of health products containing volatile oil from Citrus species* [รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยย่อย เรื่อง การพัฒนาตำรับผลิตภัณฑ์สุขภาพจากน้ำมันหอมระเหยของพืชตระกูลส้ม]. Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University.
- Hongwiwat, N., & Hongwiwat, T. (2007). *ผลไม้ 111 ชนิด: คุณค่าอาหารและการกิน*. Sangdad Publishing.
- Jaiswal, S., & Gaur, S. S. (2023). Orange peel and skin health: An exploratory study on potential benefits. *Journal of Food Chemistry & Nanotechnology*, 9(S1), S91–S99.
- Kritsadee, S., Assavapanyaporn, S., & Kunsilarak, S. (2023). The effects of essential oil from roots of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash inhalation on emotional states autonomic nervous system. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 17(3), 95–103.

- Kritsadee, S., Fakkham, S., & Sangvichien, S. (2022). Effects of Nam Prung product in Suan Sunandha Palace (Vassana scented water) inhalation on autonomic nervous system. *Thai Pharmaceutical and Health Science Journal*, 17(4), 273–277.
- Nilsuwankosit, P., Suwansichon, T., Rimkeeree, H., & et al. (2014). Development of facial treatment serum product containing niosome of fibroin hydrolysate from Eri silk cocoon. In *Proceedings of 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry* (pp. 348–355). The Thailand Research Fund.
- Potaros, T., Watthanachaiyingcharoen, R., & Potaros, T. (2021). Skin hydrating and anti-wrinkle effects of Nile Tilapia fish skin collagen cream. *Thai Pharmaceutical and Health Science Journal*, 6(2), 86–90.

ประสิทธิภาพของอาหารเหลวต่อการเจริญและพัฒนาของต้นอ่อนเอื้องมันปู (*Robiquetia succisa*)

Efficiency of liquid media cultures on growth and development of *Robiquetia succisa* (Lindl.) Seidenf. & Garay

หนึ่งฤทัย จักรศรี¹, อรุญา คำมะปะนะนา¹, อนุปันท์ กงบังเกิด² และ ธนากร วงษ์ศา^{1*}

Nuengruethai Jacksri¹, Aoraya Kammaphana¹, Anupan Kongbangkerd² and Thanakorn Wongsas^{1*}

Received: 21 October 2024 ; Revised: 12 December 2024 ; Accepted: 15 January 2025

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของอาหารเหลว Murashige and Skoog (1962) สำหรับการเพาะเลี้ยงต้นอ่อนเอื้องมันปูแบบวางนิ่งและเขย่า ด้วยการเติมน้ำมะพร้าว 150 มิลลิตรต่อลิตร ร่วมกับ 6-Benzylaminopurine (BA) และ 1-Naphthalene acetic acid (NAA) (ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า วิธีที่มีประสิทธิภาพในการช่วยชักนำให้การเพิ่มจำนวนโปรโตคอร์มไลค์บอดี (PLBs) (เฉลี่ยมากกว่า 30 โปรโตคอร์มต่อชิ้นส่วนต้นอ่อน) จากโครงสร้างรากของต้นอ่อนเอื้องมันปูได้ดีที่สุด เมื่อเลี้ยงต้นอ่อนในอาหารเหลวที่เติมน้ำมะพร้าว 150 มิลลิตรต่อลิตร เลี้ยงแบบวางนิ่ง อีกทั้งต้นกล้าเอื้องมันปูที่นำออกปลูกโดยไม่มีวัสดุปลูกมีอัตราการรอดชีวิตสูงที่สุด 90% เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านไม้หรือสแฟกนัมมอสเป็นวัสดุปลูก เมื่อเลี้ยงในสภาพโรงเรือนเพาะชำเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

คำสำคัญ: เอื้องมันปู, อาหารเหลว, โปรโตคอร์มไลค์บอดี

Abstract

The study of efficiency of Murashige and Skoog (1962) liquid medium for *in vitro* culture of young seedlings of *Robiquetia succisa* (Lindl.) Seidenf. & Garay in static and shaking culture conditions, supplemented with 150 ml/l coconut water and various concentrations of 6-Benzylaminopurine (BA) and 1-Naphthalene acetic acid (NAA) (0, 0.5, 1.0, and 2.0 mg/l) for 12 weeks. The results indicated that culturing young seedlings in the liquid medium supplemented with 150 ml/l coconut water, using the static culture method, was the most effective in inducing the proliferation of protocorm-like bodies (PLBs) (more than 30 PLBs per explant in average) from the root segments of *R. succisa* seedlings. Additionally, *R. succisa* plantlets developed without planting materials exhibited the highest survival rate of 90% compared to those grown with lump charcoal or sphagnum moss as planting materials when cultivated in a greenhouse for 12 weeks.

Keywords: *Robiquetia succisa*, liquid culture media, protocorm-like bodies

¹ โปรแกรมวิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, กำแพงเพชร 62000

² หน่วยวิจัยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช ภาควิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

¹ Program in Biology, Faculty of Science and Technology. Rajabhat Kamphaeng Phet University, Kamphaeng Phet, 62000 Thailand.

² Plant Tissue Culture Research Unit, Department of Biology, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000

* Corresponding author, e-mail: thanakorn_wo@kpru.ac.th

บทนำ

กล้วยไม้จัดเป็นทรัพยากรทางชีวภาพที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตรอยต่อของเขตพฤษภุมศาสตร์ 3 เขต คือเขตพฤษภุมศาสตร์ Indo-Burmese, Indo-Chinese และ Malesian (วรดลย์ แจ่มจำรูญ, 2558) ส่งผลให้ประเทศไทยมีความหลากหลายของกล้วยไม้พื้นเมืองหลากหลายชนิด โดยเอื้องมันปูเป็นกล้วยไม้พื้นเมืองของไทยเป็นกล้วยไม้อาศัย มีช่อดอกห้อยลงยาวประมาณ 20 เซนติเมตร ดอกสีเหลืองจำนวน 20-30 ดอก กลีบเลี้ยงและกลีบดอกสีเหลืองมีประสีน้ำตาลแดงกระจาย กลีบปากมีเดือยดอกยื่นออกเป็นกระเปาะ ปลายกลีบปากสันเป็นดิ่งแหลมสีเหลืองและมีขีดสีแดงคาดบริเวณขอบกลีบปากทั้งสองข้าง ออกดอกเดือนพฤษภาคม พบได้ในป่าแทบทุกภาคของประเทศไทย ถึงแม้ว่ามีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเพื่อเพิ่มปริมาณของกล้วยไม้ชนิดต่าง ๆ ในสภาพปลอดเชื้อ มีรายงานความสำเร็จแล้วในกล้วยไม้ในกลุ่ม *Vanda* spp. และสกุลใกล้เคียงหลายชนิดแล้ว เช่น *V. cristata* Wall. ex Lindl (Pathak *et al.*, 2002) *V. brunnea* Rchb.f. (Nowakowska *et al.*, 2022) และรูปแบบการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว เช่น *V. coerulea* Griff ex. Lindl. (Seeni & Latha, 2000) และกล้วยไม้ *Brassavola nodosa* 'Remar' x 'Mas Mejor' (Xu *et al.*, 2022) แต่มีเพียงรายงานการศึกษาการเพาะเลี้ยงกล้วยไม้ในสกุล *Robiquetia* เพียงรายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจากชิ้นส่วนใบ *R. spathulata* (Bhowmik & Rahman, 2021) เท่านั้น ดังนั้นการศึกษาถึงกระบวนการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่เหมาะสมในกล้วยไม้แต่ละชนิด จึงมีความจำเป็นต่อการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงสภาวะการเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณต้นเอื้องมันปูในสภาพปลอดเชื้อ เป็นแนวทางในการทรวางจำนวนต้นให้ได้ปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น สำหรับการผลิตต้นพันธุ์เพื่อการอนุรักษ์หรือการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ต่อไป

การทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของต้นอ่อนเอื้องมันปู

ต้นอ่อนเอื้องมันปูในสภาพปลอดเชื้อซึ่งต้นอ่อนมีใบ 1-2 ใบ ราก 1-2 ราก ขนาด 1.0-1.5 เซนติเมตร (cm) โดยนำต้นอ่อนเอื้องมันปูตัดรากออกทั้งหมด นำไปเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MS (Murashige & Skoog, 1962) ตัดแปลงเติมน้ำมะพร้าว (coconut water; cw) 150 มิลลิลิตรต่อลิตร เติมร่วมกับ

6-Benzylaminopurine (BA) และ 1-Naphthalene acetic acid (NAA) ความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ปริมาตรอาหารขวดละ 15 มิลลิลิตร ขวดละ 4 ต้น สูตรละ 5 ขวด ทำการวางเลี้ยงแบบวางนิ่ง (static) และเขย่า (shaking) บนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที ภายใต้สภาวะแสง 10 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง 25 ไมล์ต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 12 สัปดาห์ การบันทึกผลการทดลอง ทำการบันทึกจำนวนราก ความยาวราก ความยาวของใบ ความกว้างของใบ จำนวนโปรโตคอร์มไลค์บอดี (Protocorm-like bodies; PLBs)

การทดลองที่ 2 ศึกษาวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการออกปลูกในสภาพโรงเรือน

นำต้นเอื้องมันปูออกจากขวดแล้วล้างวันอาหารออกให้หมด นำต้นอ่อนปลูกลงในกระถางพลาสติกทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว โดยแปรผันวัสดุปลูก 3 ทรีตเมนต์ คือไม่ใช้วัสดุปลูก ใช้วัสดุปลูกเป็นถ่านไม้ และใช้สแฟกนัมมอสกรรมวิธีละ 30 ต้น รดน้ำวันละ 1 ครั้ง คลุมกระถางด้วยถุงพลาสติกเพื่อปรับสภาพความชื้น และเปิดออกเมื่อสังเกตว่ามีความชื้นมากเกินไป บันทึกการรอดชีวิตของต้นอ่อนเอื้องมันปูทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่บันทึกได้หาค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวนของข้อมูล และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ชิ้นส่วนต้นอ่อนเอื้องมันปูที่เลี้ยงบนอาหารเหลวมีการเจริญแตกต่างกันไปในแต่ละสภาวะการเพาะเลี้ยง (Figure 1) โดยพบว่าต้นอ่อนเอื้องมันปูที่วางเลี้ยงแบบวางนิ่งมีการสร้างรากออกมาในทุกกลุ่มทดลอง ให้ผลเช่นเดียวกับการเลี้ยงแบบเขย่า อีกทั้งการเติมน้ำมะพร้าวเพียงอย่างเดียว หรือเติมน้ำร่วมกับสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (BA และ NAA) ช่วยชักนำให้ต้นอ่อน

เอื้องมันปูมีการพัฒนาของรากเป็นจำนวนมากแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยต้นอ่อนเอื้องมันปูที่เลี้ยงในอาหารด้วยการวางนิ่งส่งผลให้ต้นอ่อนพัฒนารากมีจำนวนรากเฉลี่ยสูงที่สุด 4.8 รากต่อต้น (Figure 2)

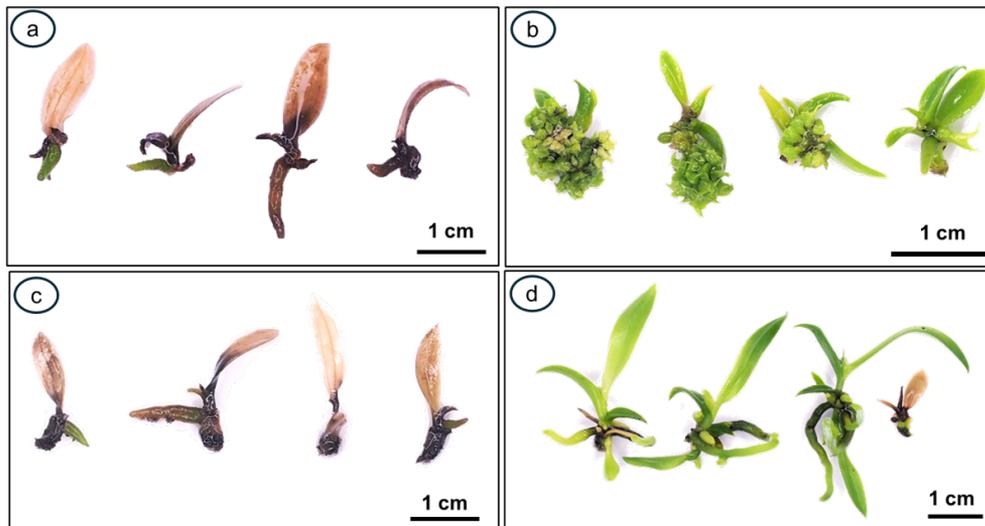


Figure 1 Some treatments of *R. succisa* plantlets were grown static (a: MS liquid medium and b: MS added 150 ml/l CW) and shaking conditions (c: MS liquid medium and d: MS added 150 ml/l CW) for 12 weeks, the scale bar is 1 cm.

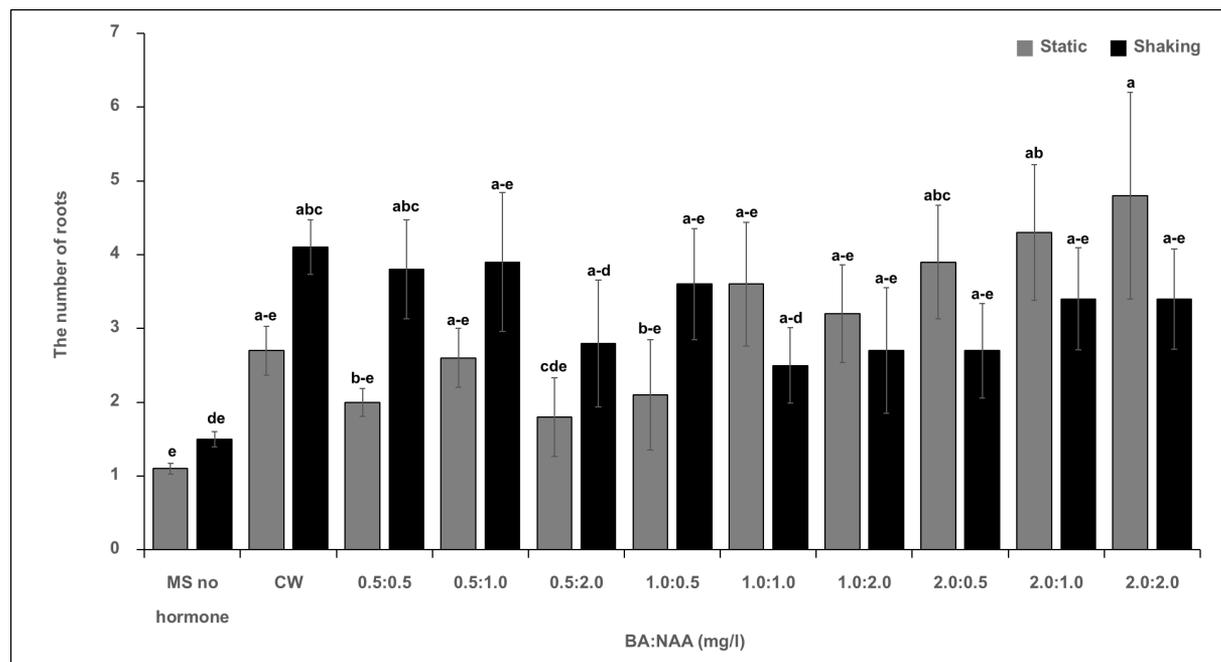


Figure 2 The number of roots of *R. succisa* plantlets grown in MS liquid medium supplemented with growth regulators and grown under static and shaking conditions for 12 weeks.

การเลี้ยงชิ้นส่วนต้นอ่อนเอื้องมันปูที่เลี้ยงบนอาหารเหลวนั้นส่งผลให้ต้นอ่อนมีการตอบสนองเกิดการเจริญกลับเป็นพืชต้นใหม่ โดยบริเวณโคนต้นและรากของต้นอ่อนเกิดการสร้างโปรโตคอร์มไลค์บอดี (Figure 3) และไม่พบการเกิดแคลลัสหรือเจริญกลับเป็นโปรโตคอร์มไลค์บอดีที่บริเวณแผ่นใบ โดยต้นอ่อนที่เลี้ยงในอาหารเหลวที่ไม่มีการเติมน้ำมะพร้าวหรือสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าต้นที่ในสภาวะ

การเลี้ยงแบบวางนิ่งไม่พบการสร้างโปรโตคอร์มไลค์บอดี แต่พบการสร้างโปรโตคอร์มไลค์บอดีจำนวนเฉลี่ย 1.8 โปรโตคอร์มไลค์บอดีต่อชิ้นส่วนของต้นอ่อน เมื่อเลี้ยงในสภาวะการเลี้ยงแบบเขย่า และพบว่ามีการสร้างโปรโตคอร์มไลค์บอดีเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อมีการเติมน้ำมะพร้าว 150 มิลลิตรต่อลิตร ทั้งในสภาวะการเลี้ยงทั้งแบบวางนิ่งและแบบเขย่า (32.8 และ 25.5 โปรโตคอร์มไลค์บอดีต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ) อีกทั้งการ

เพิ่มสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (BA ร่วมกับ NAA ที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่งผลให้มีการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ัมไลค์บอดีได้แตกต่างกันในแต่ละสภาวะการเลี้ยง โดยต้นอ่อนที่เลี้ยงในสภาวะการเลี้ยงแบบวางนิ่ง ต้นอ่อนสามารถเกิดโปรโตคอร์ัมไลค์บอดีได้เป็นจำนวนแตกต่างกัน ซึ่งอาหารเหลวที่เติมน้ำมะพร้าวเพียงอย่างเดียว (32.8 โปรโตคอร์ัมไลค์บอดีต่อชิ้นส่วน) หรือเติมน้ำมะพร้าวร่วมกับ BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ NAA 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะการเลี้ยงแบบวางนิ่ง (34.3 โปรโตคอร์ัมไลค์บอดีต่อชิ้นส่วน) ส่งผลให้ต้นอ่อนเกิดการสร้างโปรโตคอร์ัมไลค์บอดีเฉลี่ยไม่

แตกต่างจากการเลี้ยงต้นอ่อนในอาหารเหลวที่เติมน้ำมะพร้าวร่วมกับ BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ NAA 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะการเลี้ยงแบบเขย่า (34.3 โปรโตคอร์ัมไลค์บอดีต่อชิ้นส่วน) (Figure 4) โดยการเลี้ยงต้นอ่อนในอาหารเหลวที่เติมน้ำมะพร้าวร่วมกับ BA และ NAA ที่มีระดับความเข้มข้นสูงชัน ส่งผลให้การสร้างโปรโตคอร์ัมไลค์บอดีลดลงทั้งสองสภาวะ โดยเฉพาะในสภาวะการเลี้ยงแบบเขย่าส่งผลให้ต้นอ่อนมีการพัฒนาของต้นและใบที่ไม่สมบูรณ์ โดยใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและเปลี่ยนไปทั้งแผ่นใบเมื่อเลี้ยงผ่านไปเป็นเวลา 5 สัปดาห์

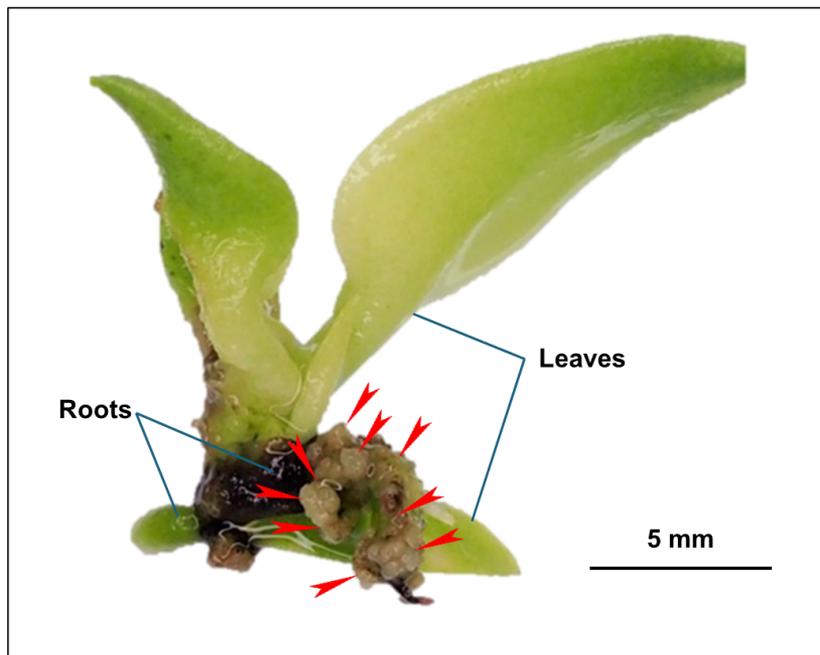


Figure 3 The direct regeneration of PLBs (arrow symbols) in root explant of *R. succisa* plantlet for 12 weeks, the scale bar is 5 mm.

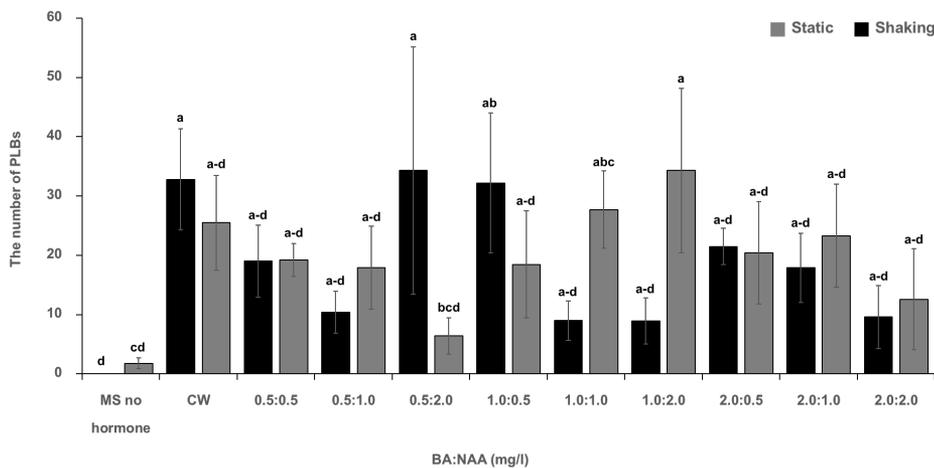


Figure 4 The number of PLBs of *R. succisa* plantlets grown in MS liquid medium supplemented with growth regulators and grown under static and shaking conditions for 12 weeks.

สำหรับการเจริญยืดยาวออกของใบและรากนั้น มีการพัฒนาที่ใกล้เคียงกัน (Figure 5 - 7) โดยต้นอ่อนที่เลี้ยงทั้งในสภาวะการเลี้ยงแบบวางนิ่งและแบบเขย่า ต้นอ่อนมีความกว้างของใบไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ยกเว้นกลุ่มทดลองที่มีการเลี้ยงต้นอ่อนในอาหารที่เติมน้ำพร้าวร่วมกับ BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะการเลี้ยงแบบเขย่า ชักนำให้ต้นอ่อนมีความกว้างใบเฉลี่ยสูงที่สุด 0.45 เซนติเมตร สำหรับการยืดยาวออกของใบมีค่าเฉลี่ยมากที่สุด 1.30 เซนติเมตร เมื่อเลี้ยงต้นอ่อนในอาหารที่เติมน้ำพร้าวเพียงอย่างเดียว และเลี้ยงในสภาวะการเลี้ยงแบบเขย่า ซึ่งทำให้มีการยืดยาวออกของรากมีความยาวเฉลี่ย 1.44 เซนติเมตรต่อราก แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยเช่นกัน

ต้นอ่อนเอื้องมันปูที่เลี้ยงในสองสภาวะมีการเจริญเติบโตได้ดีแตกต่างกัน โดยการเลี้ยงแบบเขย่าช่วยให้ต้นอ่อนมีการเจริญของรากและใบเกิดขึ้นได้ดี แต่ส่งผลให้ต้นอ่อนมีพัฒนาการไม่ดีเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของสาร

ควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่มีความเข้มข้นมาก ซึ่งต้นอ่อนที่เลี้ยงในสภาวะวางนิ่งสามารถเจริญและรอดชีวิตได้ อีกทั้งยังมีการพัฒนาสร้างโปรโตคอร์มไลค์บอดีเพื่อเพิ่มจำนวนให้เกิดต้นใหม่ได้โดยสภาวะการเลี้ยงแบบวางนิ่งพบว่าสภาวะนี้ช่วยส่งเสริมการเจริญของต้นอ่อนกล้วยไม้ *Doritaenopsis* ได้ดีกว่า (Tsai & Chu, 2008) ซึ่งกล้วยไม้ใน Subfamily Epidendroideae: monopodial taxa ส่วนใหญ่มักเกิดการเจริญกลับเป็นต้นใหม่โดยการเกิดแคลลัสหรือโปรโตคอร์มไลค์บอดี โดยเฉพาะชิ้นส่วนของแผ่นใบเป็นชิ้นส่วนเริ่มต้นในการเพาะเลี้ยง (Sheelavanthmath *et al.*, 2005; Pathaka *et al.*, 2022) จากการทดลองครั้งนี้ พบว่าการเจริญกลับเป็นต้นใหม่ของการเกิดโปรโตคอร์มไลค์บอดีที่บริเวณรากต้นอ่อนเอื้องมันปู เป็นรูปแบบของการเจริญกลับเป็นต้นใหม่เช่นเดียวกับการชักนำให้เกิดโปรโตคอร์มไลค์บอดีจากชิ้นส่วนรากของกล้วยไม้ลูกผสม *Doritaenopsis* 'New candy'/D. ('Mary Anes'/'Ever Spring') (Park *et al.*, 2003) และรากของกล้วยไม้ลูกผสม *Phalaenopsis* 'Join Angle X Sogo Musadian' (Meilasari & Iriawati, 2016)

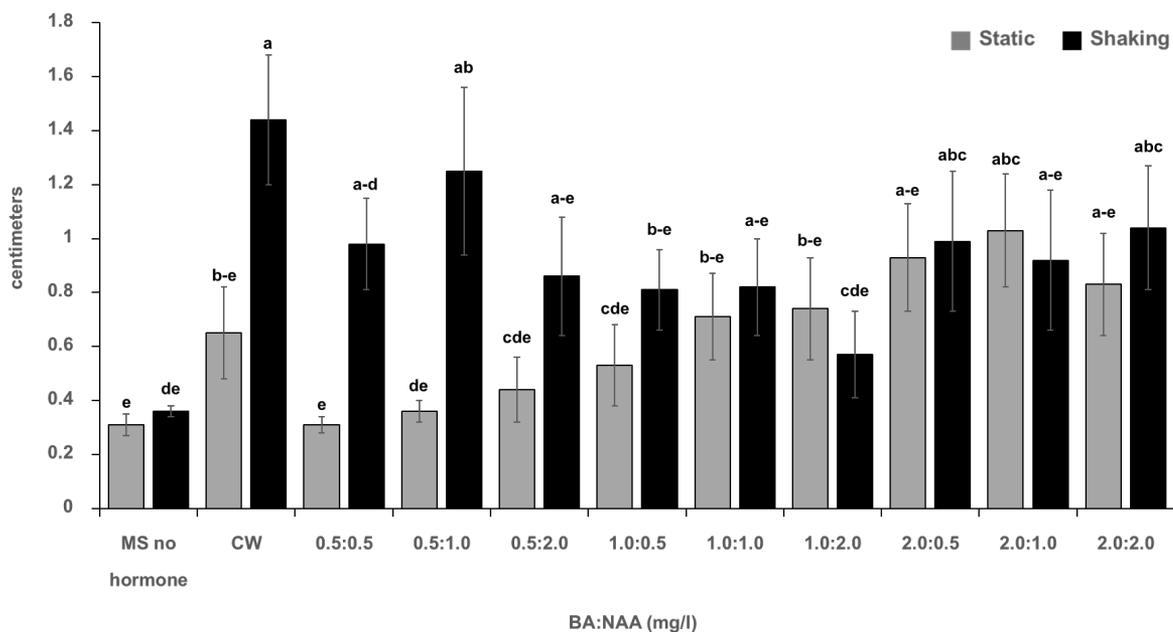


Figure 5 The length of roots of *R. succisa* plantlets grown in MS liquid medium supplemented with growth regulators and grown under static and shaking conditions for 12 weeks.

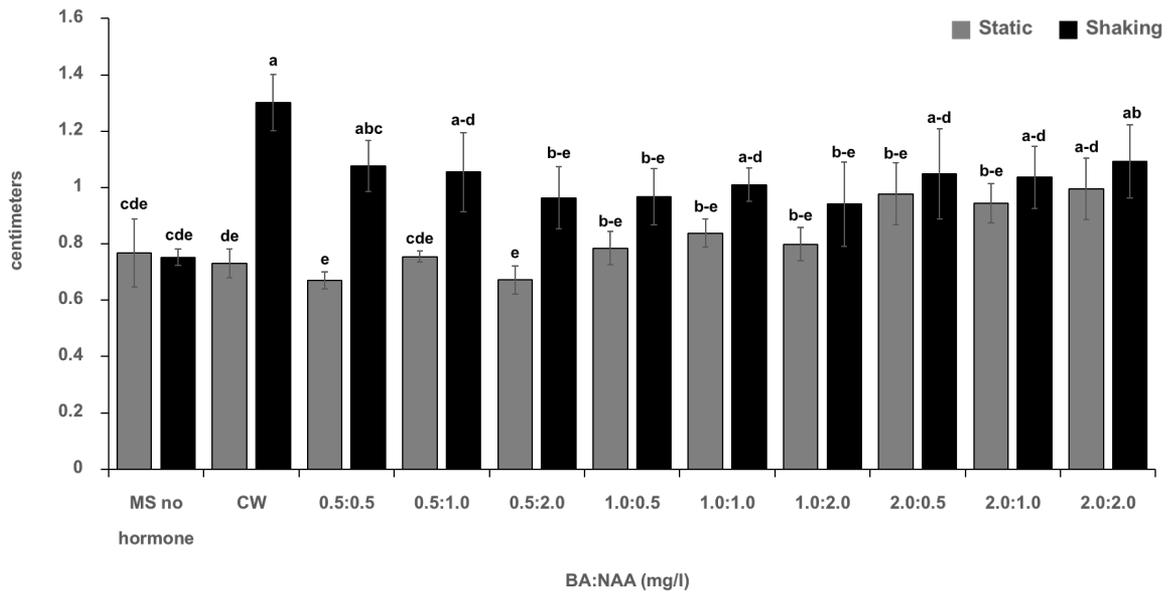


Figure 6 The length of leaves of *R. succisa* plantlets grown in MS liquid medium supplemented with growth regulators and grown under static and shaking conditions for 12 weeks.

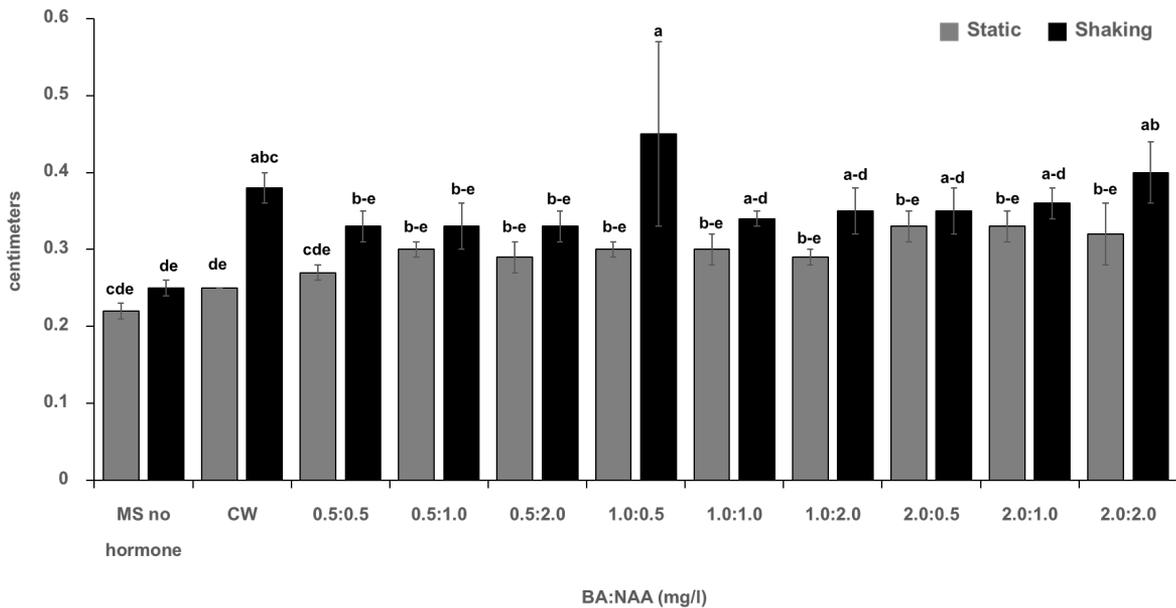


Figure 7 The width of leaves of *R. succisa* plantlets grown in MS liquid medium supplemented with growth regulators and grown under static and shaking conditions for 12 weeks.

อีกทั้งการเติมสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (น้ำมะพร้าว) และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่เติมลงไป ในอาหารเหล่านั้น ช่วยส่งเสริมการเจริญของต้นอ่อนเอื้องมันปู ได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับต้นอ่อนที่เลี้ยงในอาหาร เหลวที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ดังกล่าว โดยมีรายงานการ ศึกษาผลของสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมะพร้าว น้ำสกัดมันฝรั่ง กล้วยบด 'Gros Michel' (AAA group) และ กล้วยบด 'Namwa' banana (ABB group) ที่เติมลงในอาหาร

เพาะเลี้ยงมีส่วนช่วยให้ต้นกล้วยไม้ในสกุล *Vanda* และ *Mokara* มีพัฒนาการของต้นและรากที่ดี ซึ่งชนิดของกล้วยไม้ มีผลต่อการตอบสนองต่อสารประกอบอินทรีย์ที่แตกต่างกันอีก ด้วย (Obsuwan & Thepsithar, 2014) อีกทั้งยังมีรายงานการ ศึกษาถึงผลของน้ำมะพร้าวในอาหารเพาะเลี้ยงที่มีการเติมสาร ควบคุมการเจริญร่วมด้วย น้ำมะพร้าวช่วยส่งเสริมการเจริญ ของต้นอ่อนกล้วยไม้ *V. pumila* ได้ดีมากยิ่งขึ้น (Maharjan et al., 2019) นอกจากนี้การเติมสารควบคุมการเจริญเติบโตของ

พืชที่เติมลงไปให้อาหารเหลว โดยเฉพาะการเติม BA ร่วมกับ NAA นั้น สามารถชักนำให้เกิด PLBs จากชิ้นส่วนเพาะเลี้ยงได้ดี เช่น ชิ้นส่วนใบของ *V. coerulea* เกิดโปรโตคอร์มจำนวน 75 โปรโตคอร์มไลค์บอดีต่อใบ เมื่อเลี้ยงใบบนอาหาร Mitra *et al.* medium ที่มี 3% sucrose ร่วมกับการเติม 8.8 μM BA ร่วมกับ 4.1 หรือ 8.8 μM NAA เป็นเวลา 8 สัปดาห์ (Seeni & Latha, 2000) อีกทั้งการใช้ชิ้นส่วนแผ่นใบของ *R. spathulata* มาชักนำให้เกิดโปรโตคอร์มไลค์บอดีบนอาหารฐานสูตร MS ที่เติม BAP 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การพัฒนามาเป็นโปรโตคอร์มไลค์บอดีสูงสุดถึง 70% (Bhowmik & Rahman, 2021) และการเลี้ยงชิ้นส่วนฐานใบของ *Aerides odorata* เกิดการสร้างยอดใหม่เฉลี่ย 4.8 ยอดต่อชิ้นส่วนใบ เมื่อวางเลี้ยงชิ้นส่วนใบบนอาหาร 1/2 MS ที่มีการเติม BA 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Devi *et al.*, 2013) ด้วยเช่นกัน

การทดลองที่ 2 ศึกษาเปรียบเทียบวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการออกปลูกในสภาพโรงเรือน

การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการออกปลูกในสภาพโรงเรือน ด้วยวัสดุปลูกต่างกัน พบว่า ต้นกล้าเอื้องมันปูที่ไม่ใช้วัสดุปลูกเริ่มตายในสัปดาห์ที่ 3 และมี

อัตราการรอดชีวิตมากที่สุด 27 ต้นจาก 30 ต้นคิดเป็น 90% ต้นเอื้องมันปูที่ใช้ถ่านไม้เป็นวัสดุปลูกเริ่มตายในสัปดาห์ที่ 4 และมีอัตราการรอดชีวิตจำนวน 24 ต้นจาก 30 ต้นคิดเป็น 80% และต้นเอื้องมันปูที่ใช้สแฟกนัมมอสเป็นวัสดุปลูกเริ่มตายในสัปดาห์ที่ 3 และมีอัตราการรอดชีวิตจำนวน 24 ต้นจาก 30 ต้นคิดเป็น 80% ในสัปดาห์ที่ 12 ต้นเอื้องมันปูที่ไม่มีวัสดุปลูกมีการรอดชีวิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่ใช้ถ่านไม้และ สแฟกนัมมอสในการเป็นวัสดุปลูกเป็นอัตราการรอดชีวิต 90% โดยไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Figure 8) ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองที่ใช้ต้นกล้วยไม้ *Dendrobium wilsonii* ในการทดลองพบว่าเมื่อนำต้นกล้วยมาเลี้ยงบนสแฟกนัมมอสมีอัตราการรอดชีวิต 100% (Zhang & Fang, 2005) ส่วนการนำกล้วยไม้ *D. 'Sonia'* ย้ายปลูกในถ่านไม้มีอัตราการรอดชีวิตเป็น 84% (Puchooa, 2004) เนื่องจากเอื้องมันปูเป็นกล้วยไม้อิงอาศัยที่มีการเจริญทางยอด มีความต้องการความชื้นที่เหมาะสม หากมีความชื้นมากเกินไป จะส่งผลให้รากเกิดการเน่า ดังนั้นการใช้ถ่านไม้หรือสแฟกนัมมอสเป็นวัสดุปลูกจึงไม่เหมาะสม ซึ่งเป็นข้อดีในการอนุบาลต้นอ่อนออกปลูกโดยไม่มีการใช้วัสดุปลูก ทำให้ลดต้นทุนของขั้นตอนการอนุบาลต้นพืชได้เป็นอย่างมาก

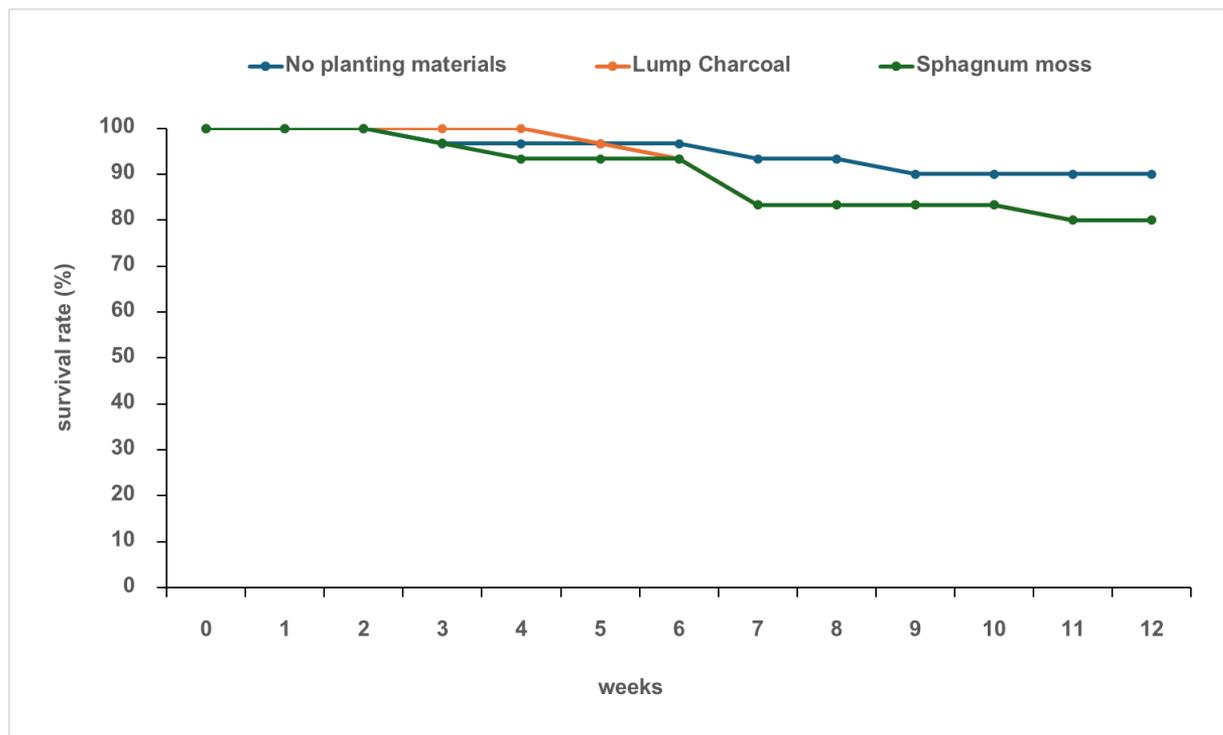


Figure 8 The survival rate of *R. succisa* plantlets during 12 weeks of acclimatization.

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิธีการเลี้ยงต้นอ่อนเอื้องมันปูในอาหารเหลวที่มีการเติมหน้ามะพร้าวและวางเลี้ยงแบบไม่มีการเขย่านั้น เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับขั้นตอนการทวีจำนวนต้นอ่อนเอื้องมันปูในสภาพปลอดเชื้อ ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยงที่ช่วยลดต้นทุนการใช้เครื่องเขย่าเลี้ยงได้ อีกทั้งยังสามารถนำต้นกล้าเอื้องมันปูออกปลูกและปรับสภาพในโรงเรือนเพาะชำโดยไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุปลูกซึ่งมีอัตราการรอดชีวิตสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวอัญญา สมหวัง สำหรับความอนุเคราะห์ฝึกเอื้องมันปู และนางสาวอาทิตย์ยา ใจเที่ยง สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัย และห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช โปรแกรมวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร สำหรับสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วรดลย์ แจ่มจำรูญ. (2558). รูปแบบของความเฉพาะถิ่นและความหายากของพืชในประเทศไทย. ใน ดอกรัก มารอด, & จงรัก วัชรินทร์รัตน์ (บ.ก.), *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิชาการเครือข่ายวิจัยนิเวศวิทยาป่าไม้แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4* (น. 36–43). คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

Bhowmik, T. K., & Rahman, M. (2021). Development of an efficient protocol for *Robiquetia spathulata* (Bl) J.J. Sm. an endangered orchid species through *in vitro* techniques. *SUST Journal of Science and Technology*, 31(1), 1–6.

Devi, H. S., Devi, S. I., & Singh, T. D. (2013). High frequency plant regeneration system of *Aerides odorata* Lour. through foliar and shoot tip culture. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 41(1), 169–176.

Maharjan, S., Pradhan, S., Thapa, B. B., & Pant, B. (2019). *In vitro* propagation of endangered orchid, *Vanda pumila* Hook.f. through protocorms culture. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 1220–1232.

Meilasari, D., & Iriawati, I. (2016). Regeneration of plantlets through plb (protocorm-like body) formation in *Phalaenopsis* 'Join Angle X Sogo Musadian'. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 48(3), 204–212.

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15, 473–497.

Nowakowska, K., Marciniak, P., & Pacholczak, A. (2022). A protocol for efficient micropropagation of rare orchid *Vanda brunnea* Rchb.f. *South African Journal of Botany*, 150, 233–239.

Obsuwan, K., & Thepsithar, C. (2014). An effect of organic supplements on stimulating growth of *Vanda* and *Mokara* seedlings in tissue culture. *International Journal of Bioengineering and Life Sciences*, 8(7), 696–698.

Park, S. Y., Murthy, H. N., & Paek, K. Y. (2003). Protocorm-like body induction and subsequent plant regeneration from root tip cultures of *Doritaenopsis*. *Plant Science*, 164, 919–923.

Pathak, P., Kumari, A., Chandler, B. D., & Zettler, L. W. (2022). *In vitro* propagation and phytochemical analysis of *Vanda cristata* Wall. ex Lindl.: An endangered medicinal orchid of biopharmaceutical importance. *South African Journal of Botany*, 151, 109–123.

Pathak, P., Sunita, Kumari, A., Thakur, B., Vasundhra, & Madhu. (2022). Regeneration competence of an endangered orchid, *Vanda cristata* Wall. ex Lindl. using leaf explants: A study *in vitro*. *South African Journal of Botany*, 151, 1018–1024.

Puchooa, D. (2004). Comparison of different culture media for the *in vitro* culture of *Dendrobium* (Orchidaceae). *International Journal of Agriculture & Biology*, 6(5), 884–888.

Seeni, S., & Latha, P. G. (2000). *In vitro* multiplication and ecorehabilitation of the endangered blue Vanda. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 61, 1–8.

Sheelavanthmath, S. S., Murthy, H. N., Hema, B. P., Hahn, E. J., & Paek, K. Y. (2005). High frequency of protocorm-like bodies (PLBs) induction and plant regeneration from protocorm and leaf sections of *Aerides crispum*. *Scientia Horticulturae*, 106(3), 395–401.

Tsai, W. T., & Chu, C. Y. (2008). Static liquid culture of *Doritaenopsis* seedlings. *HortScience*, 43(1), 206–210.

- Xu, J., Beleski, D. G., & Vendrame, W. A. (2022). Effects of culture methods and plant growth regulators on *in vitro* propagation of *Brassavola nodosa* (L.) Lindl. hybrid. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 58, 931–941.
- Zhang, Q. X., & Fang, Y. M. (2005). Tissue culture and *in vitro* seedling and protocorm-like body examination of *Dendrobium candidum*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 25, 1761–1765.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมการทำเหมืองกฎความสัมพันธ์ระหว่าง Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-Mine สำหรับการวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า

Performance comparison of association rule mining algorithms among Apriori, FP-Growth, FP-Max, and H-Mine for market basket analysis

กริชบดินทร์ ผิวหอม^{1*}

Kritbodin Phiwhorm^{1*}

Received: 11 September 2024 ; **Revised:** 20 December 2024 ; **Accepted:** 19 February 2025

บทคัดย่อ

การทำเหมืองกฎความสัมพันธ์เป็นเทคนิคสำคัญในการวิเคราะห์ตะกร้าสินค้าสำหรับธุรกิจค้าปลีก แต่มักประสบปัญหาด้านความเร็วในการประมวลผลและการใช้หน่วยความจำ โดยเฉพาะกับชุดข้อมูลขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 4 อัลกอริทึม ได้แก่ Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-Mine โดยใช้ชุดข้อมูลร้านขายของชำสำหรับการวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า ภายใต้ค่าสนับสนุนที่ต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึม H-Mine มีประสิทธิภาพดีที่สุดในทั้งด้านความเร็วในการประมวลผลและการใช้หน่วยความจำ เนื่องจากใช้โครงสร้างข้อมูลแบบ Hyperlink ที่มีประสิทธิภาพ ตามด้วยอัลกอริทึม FP-Growth และ FP-Max ที่ใช้โครงสร้าง FP-Tree ช่วยลดการสแกนฐานข้อมูล ในขณะที่อัลกอริทึม Apriori แสดงประสิทธิภาพต่ำที่สุด

คำสำคัญ: กฎความสัมพันธ์, อัลกอริทึมอะพริออริ, อัลกอริทึมเอฟพี-โกรท, อัลกอริทึมเอฟพี-แมก, อัลกอริทึมเอช-ไมน์

Abstract

Association rule mining is a crucial technique for market basket analysis in retail businesses, but it often faces challenges in processing speed and memory usage, particularly with large-scale datasets. This research presents a performance comparison of four algorithms: Apriori, FP-Growth, FP-Max, and H-Mine, using a grocery store dataset for market basket analysis under varying support thresholds. The results showed that the H-Mine algorithm demonstrated superior performance in both execution time and memory usage, attributed to its efficient Hyperlink data structure, followed by FP-Growth and FP-Max algorithms, which employ FP-Tree structure to minimize database scanning. Meanwhile, the Apriori algorithm exhibited the lowest performance.

Keywords: Association rule mining, Apriori, FP-Growth, FP-Max, H-Mine

¹ อาจารย์, สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ 33000

¹ Lecturer, Department of Computer Science, Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University 33000

* Corresponding author, e-mail: kritbodin.p@sskru.ac.th

บทนำ

การทำเหมืองข้อมูลกฎความสัมพันธ์ (Association Rule Mining) เป็นเทคนิคเพื่อช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมผู้บริโภค โดยเฉพาะการวิเคราะห์การซื้อสินค้าของลูกค้า (Market Basket Analysis) ที่ช่วยให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมกรรมการซื้อของลูกค้าได้ดีขึ้น (Adeniji et al., 2015; Mustakim et al., 2018)

เทคนิคการทำเหมืองข้อมูลกฎความสัมพันธ์ได้ถูกนำมาใช้ค้นหาความสัมพันธ์ที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล (Mustakim et al., 2018; Slimani & Lazzez, 2014) และมีหลายอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมในการค้นหาความสัมพันธ์ เช่น อัลกอริทึม Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-Mine เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีแนวคิด วิธีการ จุดแข็ง และข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป (Nigam et al., 2017) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาณข้อมูลอย่างรวดเร็วได้นำมาซึ่งความท้าทายด้านประสิทธิภาพในการประมวลผลและการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำเป็นอย่างมาก (Garg & Kumar, 2013)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 4 อัลกอริทึมในการทดลองกับชุดข้อมูลร้านขายของชำ (Groceries dataset) ทั้งด้านความเร็วในการประมวลผลและด้านการใช้หน่วยความจำ เพื่อเป็นข้อมูลที่ช่วยให้การเลือกใช้ อัลกอริทึมได้เหมาะสมกับข้อมูลที่หลากหลาย และการทำงานมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการค้นหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้รับนิยาม 4 อัลกอริทึม ดังนี้

1. อัลกอริทึม Apriori

อัลกอริทึม Apriori เป็นอัลกอริทึมพื้นฐานที่นำเสนอโดย Agrawal and Srikant (1994) ซึ่งอาศัยแนวคิดการค้นหาชุดรายการที่เกิดขึ้นบ่อยแบบเป็นลำดับขั้น (level-wise approach) โดยเริ่มจากชุดรายการขนาดเล็ก และค่อย ๆ ขยายไปสู่ชุดรายการที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

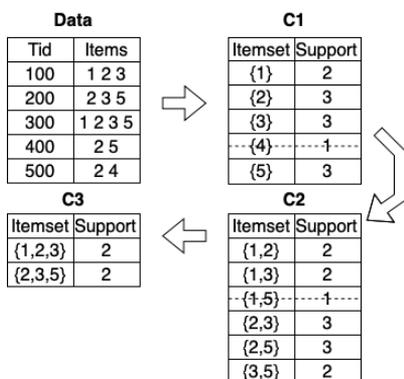


Figure 1 The Apriori algorithm working process

จาก Figure 1 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม Apriori เพื่อหาไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อย (Frequent itemsets) หรือ ไอเทมที่มีค่าสนับสนุนมากกว่าหรือเท่ากับค่าสนับสนุนขั้นต่ำ (Minimum support) โดยเริ่มจากการนำข้อมูล (Data) มาสร้างไอเทมเซตขนาด 1 (C1) และคำนวณค่าสนับสนุน (Support value) ของแต่ละไอเทม หากค่าสนับสนุนต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะถูกตัดออก (จากตัวอย่างกำหนดค่าสนับสนุนมากกว่าหรือเท่ากับ 2) เช่น ไอเทมเซต {4} มีค่าสนับสนุนเป็น 1 จึงถูกตัดออก จากนั้นจะนำไอเทมที่เหลือมาสร้างเป็นไอเทมเซตขนาด 2 (C2) และคำนวณค่าสนับสนุนอีกครั้ง โดยไอเทมเซต {1,5} มีค่าสนับสนุนต่ำกว่า 2 จึงถูกตัดออกเช่นกัน

กระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปโดยนำไอเทมเซตที่เหลือมาสร้างเป็นไอเทมเซตขนาด 3 (C3) ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายจะเหลือเพียงไอเทมเซต {1,2,3} และ {2,3,5} แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม Apriori ต้องสแกนฐานข้อมูลหลายรอบและสร้างชุดตัวแทนจำนวนมากในแต่ละรอบ แม้ว่าจะมีการตัดไอเทมเซตที่มีค่าสนับสนุนต่ำออกเพื่อลดขนาดของชุดตัวแทนในรอบถัดไป แต่ก็ยังคงต้องใช้ทรัพยากรในการประมวลผลค่อนข้างมาก

2. อัลกอริทึม FP-Growth

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของอัลกอริทึม Apriori จึงได้มีการพัฒนาอัลกอริทึม FP-Growth (Frequent Pattern Growth) โดย Han et al. (2000) ซึ่งใช้อาศัยโครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ที่เรียกว่า FP-Tree (Frequent Pattern Tree) ในการจัดเก็บข้อมูลและค้นหารูปแบบที่เกิดขึ้นบ่อยอย่างมีประสิทธิภาพ

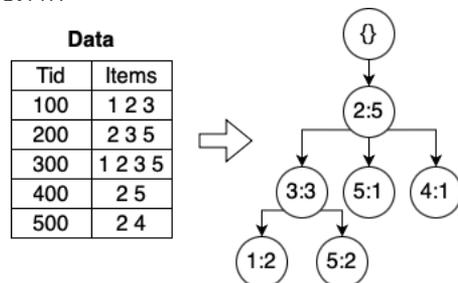


Figure 2 The FP-Growth algorithm working process

จาก Figure 2 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม FP-Growth โดยเริ่มจากการสร้างโหนดราก (Root) เป็น {} จากนั้นจะแทรกรายการข้อมูลลงในต้นไม้ทีละรายการ โดยรายการที่มีค่าความถี่สูงจะอยู่ใกล้รากมากกว่า เช่น โหนด (2:5) แสดงว่าไอเทม 2 มีความถี่ 5 ครั้ง และมีการเชื่อมโยงไปยังไอเทมอื่นๆ ที่เกิดร่วมกัน ทำให้ลดพื้นที่การจัดเก็บข้อมูล

และประสิทธิภาพในการค้นหาไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อย เนื่องจากสามารถใช้โครงสร้างต้นไม้แทนการสแกนฐานข้อมูลซ้ำๆ เหมือนอัลกอริทึม Apriori

3. อัลกอริทึม FP-Max

อัลกอริทึม FP-Max เป็นการพัฒนาต่อยอดจากอัลกอริทึม FP-Growth โดย Grahne and Zhu (2003) ซึ่งมุ่งเน้นการค้นหาเฉพาะชุดรายการที่เกิดขึ้นบ่อยสูงสุด (maximal frequent itemsets) ส่งผลให้สามารถลดพื้นที่การค้นหา และเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล โดยเฉพาะในกรณีของฐานข้อมูลที่มีชุดรายการที่เกิดขึ้นบ่อยจำนวนมาก

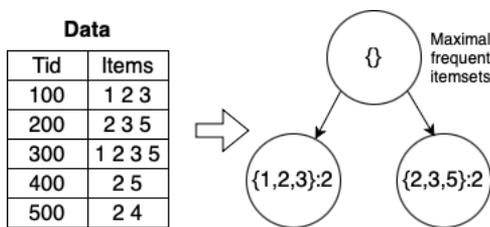


Figure 3 The FP-Max algorithm working process

จาก Figure 3 เป็นการทำงานของอัลกอริทึม FP-Max แสดงให้เห็นว่าโหนดราก $\{\}$ แยกออกเป็นสองกิ่งที่เก็บไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อยสูงสุด คือ $\{1,2,3\}$ และ $\{2,3,5\}$ โดยแต่ละชุดมีความถี่เท่ากับ 2 ทำให้ลดการจัดเก็บไอเทมเซตย่อยที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้พื้นที่จัดเก็บน้อยลงและค้นหาได้เร็วขึ้น (Borah & Nath, 2021)

4. อัลกอริทึม H-Mine

อัลกอริทึม H-Mine พัฒนาโดย Jian และคณะ ในปี 2001 (Pei *et al.*, 2001) เพื่อแก้ไขปัญหาการใช้หน่วยความจำของอัลกอริทึม FP-Growth โดยใช้โครงสร้าง H-struct

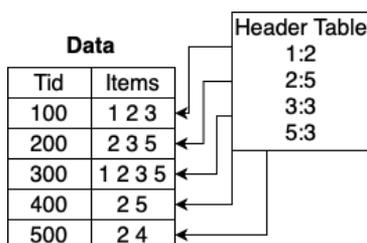


Figure 4 The H-Mine algorithm working process

จาก Figure 4 เป็นการทำงานของอัลกอริทึม H-Mine โดยใช้โครงสร้างข้อมูลแบบตารางส่วนหัว (Header Table) ในการเก็บข้อมูลไอเทมและความถี่ที่เกิดขึ้น เช่น 1:2 หมายถึงไอเทม 1 มีความถี่ 2 ครั้ง และมีลูกศรเชื่อมโยงแบบ

ไฮเปอร์ลิงก์ (Hyperlink) ไปยังข้อมูลที่มีไอเทม 1 อยู่ วิธีนี้ช่วยลดการใช้หน่วยความจำเมื่อเทียบกับการสร้างต้นไม้แบบ FP-Tree (Pei *et al.*, 2001)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือวิจัย

- ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Macbook Pro CPU 1.4GHz Quad-Core intel Core i5 RAM 8GB.
- ใช้ภาษาโปรแกรม Python ผ่าน Colab Jupyter Notebook บน Cloud ของ Google ใช้ชุดโปรแกรม Microsoft Office 365 (Microsoft Excel) เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

2. ข้อมูลการทดลอง

การทดลองนี้ใช้ชุดข้อมูลร้านขายของชำ (Groceries dataset) จาก Kaggle.com (Dedhia, 2022) ประกอบด้วยจำนวนข้อมูลรายการ (Transaction data) จำนวน 25,000 - 38,000 รายการ ดัง Table 1 และตัวอย่างข้อมูลดัง Table 2

Table 1 Details of Groceries Dataset Division

Number of Transactions (records)	Support values
25,000	0.2-1.0
28,000	0.2-1.0
30,000	0.2-1.0
35,000	0.2-1.0
38,000	0.2-1.0

จาก Table 1 แสดงรายละเอียดการแบ่งชุดข้อมูลร้านขายของชำออกเป็น 5 กลุ่ม ตามจำนวน Transaction โดยแต่ละกลุ่มจะกำหนดค่า support ขั้นต่ำที่ 0.2 ถูกเลือกเพื่อกรองรูปแบบความสัมพันธ์ที่มีความถี่ต่ำและอาจไม่มีนัยสำคัญออก ซึ่งช่วยลดเวลาในการประมวลผลและจำนวนกฎความสัมพันธ์ที่ไม่จำเป็น ในขณะที่ค่า support สูงสุดที่ 1.0 ถูกใช้เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมการซื้อที่เป็นที่นิยมของลูกค้า นอกจากนี้ การกระจายค่า support เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและเป็นระบบ

Table 2 Sample of Groceries Dataset

Transaction	Items
T1	tropical fruit
T2	whole milk
T3	pip fruit
T4	citrus fruit, whole milk
T5	frankfurter, citrus fruit
T6	whole milk, dessert
T7	tropical fruit, sausage, pork
T8	pastry, citrus fruit, soda
T9	pot plants, dessert, root vegetables, sausage
T10	whole milk, chicken, butter, turkey

จาก Table 2 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง โดยแต่ละรายการ (Transaction) ประกอบด้วย Transaction ID และรายการสินค้า (Items) ที่ลูกค้าซื้อในครั้งนั้น จะเห็นได้ว่าแต่ละ Transaction มีจำนวนสินค้าที่แตกต่างกัน เช่น T1 มีการซื้อเพียง tropical fruit อย่างเดียว ในขณะที่ T9 มีการซื้อถึง 4 รายการ ได้แก่ pot plants, dessert, root vegetables และ sausage นอกจากนี้ ยังพบรูปแบบที่น่าสนใจ เช่น citrus fruit มักถูกซื้อพร้อมกับสินค้าอื่น (T4, T5, T8) และ whole milk ปรากฏในหลาย Transactions (T2, T4, T6, T10) ซึ่งความถี่ในการปรากฏของสินค้าเหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า Support values ที่กำหนดใน Table 1 (0.2-1.0) เพื่อค้นหารูปแบบไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อยด้วยอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบต่อไป

จากลักษณะข้อมูลข้างต้น เมื่อพิจารณาในบริบทของการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ พบว่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติของ Big Data (Gandomi & Haider, 2015; Han *et al.*, 2006) หลายประการที่สำคัญ ได้แก่ Volume (ปริมาณ) ด้วยจำนวน Transactions ตั้งแต่ 25,000 ถึง 38,000 รายการ ซึ่งเพียงพอที่จะแสดงให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพในการประมวลผลของแต่ละอัลกอริทึม Variety (ความหลากหลาย) จากรายการสินค้าที่หลากหลายประเภท ซึ่งก่อให้เกิดรูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน Velocity (ความเร็ว) ที่สะท้อนผ่านการทดสอบที่ค่าสนับสนุนต่ำ (0.2) เพื่อจำลองสถานการณ์ที่ต้องการการประมวลผลอย่างรวดเร็วในการค้นหาความสัมพันธ์ทั้งหมด และ Veracity (ความถูกต้อง) เป็นการนำข้อมูล Transactions จากร้านขายของชำมาทดสอบความสามารถด้วยอัลกอริทึมในการจัดการกับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนและความซับซ้อนในสภาพแวดล้อมจริง

3. ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักขั้นตอนการวิจัยการทำเหมืองข้อมูลของ Han *et al.* (2006) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลร้านขายของชำมาวิเคราะห์ กำจัดความซ้ำซ้อนและจัดกลุ่ม พร้อมบันทึกไฟล์เป็น .csv ก่อนทำการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลการทดลองออกเป็นหลายกลุ่มย่อยตามตารางที่ 1

3.3 ขั้นตอนการค้นหาไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อยด้วยอัลกอริทึม Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-Mine โดยงานวิจัยนี้ได้นำไลบรารี mlxtend.frequent_patterns เวอร์ชัน 0.23.4 (Raschka, 2018) มาใช้ในการทดลอง เนื่องจากเป็นไลบรารีที่รวบรวมอัลกอริทึมสำหรับการทำเหมืองกฎความสัมพันธ์ที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมในงานวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า โดยในการทดลองได้กำหนดค่า min_support ตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.0 ซึ่งครอบคลุมทั้งค่าที่ต่ำ (0.2) เพื่อค้นหารูปแบบที่เกิดขึ้นน้อยแต่อาจมีความสำคัญ ไปจนถึงค่าสูง (1.0) เพื่อค้นหารูปแบบที่พบบ่อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ใช้ค่าเริ่มต้นของไลบรารี

3.4 ขั้นตอนการวัดผลและการประเมินผลลัพธ์ เพื่อทำการเปรียบเทียบความเร็ว (Execution time) หน่วยเป็นวินาที (Second) และการใช้หน่วยความจำ (Memory usage) หน่วยเป็นกิกะไบต์ (Gigabyte) โดยกำหนดค่าสนับสนุนที่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 แล้วนำแต่ละกลุ่มข้อมูลมาทดสอบจำนวน 10 รอบ เพื่อลดความเสี่ยงจากค่าผิดพลาดที่เกิดจากการทดลองไม่เพียงพอ (Borah & Nath, 2021) แสดงตัวอย่างการคำนวณ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็ว เมื่อกำหนดค่าสนับสนุนเท่ากับ 0.2 ความเร็วแต่ละรอบเท่ากับ 5, 6, 5, 7, 6, 5, 6, 5, 7, 6 วินาที ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความเร็วมีค่าเท่ากับ $(5+6+5+7+6+5+6+5+7+6)/10$ หรือ 5.8 วินาที

ตัวอย่างการคำนวณหาการใช้หน่วยความจำ เมื่อกำหนดค่าสนับสนุนเท่ากับ 0.2 ค่าการใช้หน่วยความจำแต่ละรอบเท่ากับ 1, 2, 1, 3, 2, 1, 2, 1, 3, 2 GB ดังนั้นค่าเฉลี่ยของการใช้หน่วยความจำ เท่ากับ $(1+2+1+3+2+1+2+1+3+2)/10$ หรือ 1.8 GB

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-Mine ด้วยชุดข้อมูลร้านขายของชำ ด้วยความเร็วและการใช้หน่วยความจำในการค้นหาไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อย ด้วยค่าสนับสนุนที่แตกต่างกัน แสดงผลได้ดังนี้

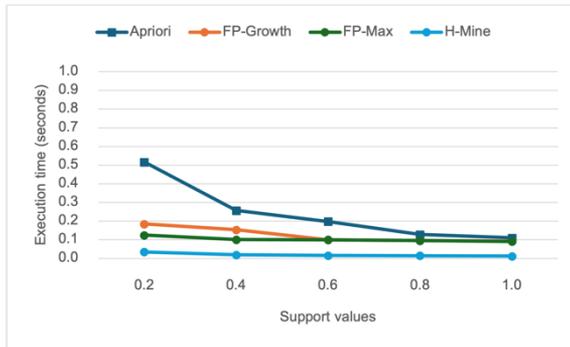


Figure 5 Comparison of execution time and support values for 25,000 transaction records

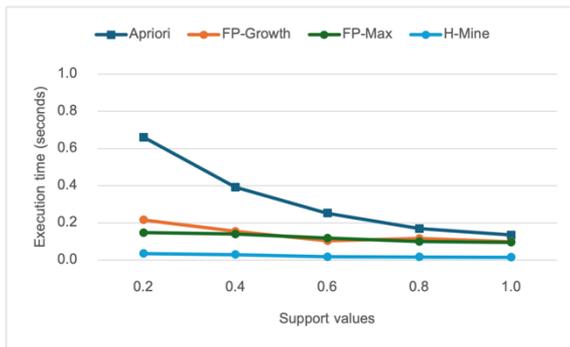


Figure 6 Comparison of execution time and support values for 28,000 transaction records

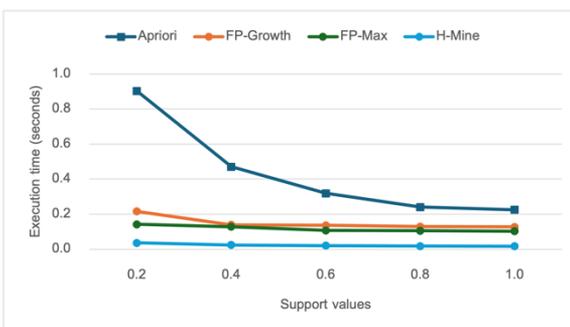


Figure 7 Comparison of execution time and support values for 30,000 transaction records

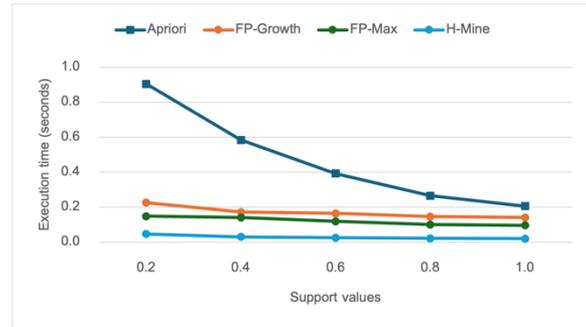


Figure 8 Comparison of execution time and support values for 35,000 transaction records

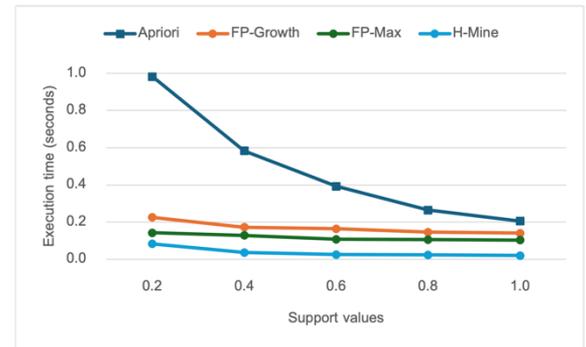


Figure 9 Comparison of execution time and support values for 38,000 transaction records

จาก Figure 5-9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาการทำงานของอัลกอริทึม Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-mine โดยทดสอบกับชุดข้อมูล Transaction ขนาด 25,000 ถึง 38,000 รายการ และกำหนดค่าสนับสนุนตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.0 ผลการทดลองพบว่า H-mine มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุดและค่อนข้างคงที่แม้ขนาดข้อมูลจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัลกอริทึม Apriori ใช้เวลามากที่สุด โดยเฉพาะที่ค่าสนับสนุนต่ำ และเวลาจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดข้อมูลเพิ่มขึ้น ส่วนอัลกอริทึม FP-Growth และ FP-Max มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันและดีกว่า อัลกอริทึม Apriori แต่ยังคงใช้เวลามากกว่าอัลกอริทึม H-Mine อย่างไรก็ตามเมื่อค่าสนับสนุนสูงขึ้น ประสิทธิภาพของทุกอัลกอริทึมจะใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากมีจำนวนไอเทมเซตที่ต้องตรวจสอบน้อยลง (Borah & Nath, 2021; Garg & Kumar, 2013)

เมื่อพิจารณาที่ค่าสนับสนุนต่ำสุด (0.2) โดยเฉลี่ยจากทุกชุดข้อมูล (25,000-38,000 transactions) พบว่าอัลกอริทึม H-Mine มีความเร็วสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเร็วกว่าอัลกอริทึม Apriori ประมาณ 94% (คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ H-Mine 0.047 วินาที เทียบกับ Apriori 0.794 วินาที), เร็วกว่า FP-Growth ประมาณ 78% (H-Mine 0.047 วินาที เทียบกับ 0.214 วินาที) และเร็วกว่า FP-Max ประมาณ

72% (H-Mine 0.047 วินาที เทียบกับ 0.167 วินาที) โดยคำนวณจากสูตร ((เวลาเฉลี่ยของอัลกอริทึมที่ช้ากว่า - เวลาเฉลี่ยของ H-Mine) / เวลาเฉลี่ยของอัลกอริทึมที่ช้ากว่า) × 100 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง Hyperlink ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาและการจัดการหน่วยความจำ

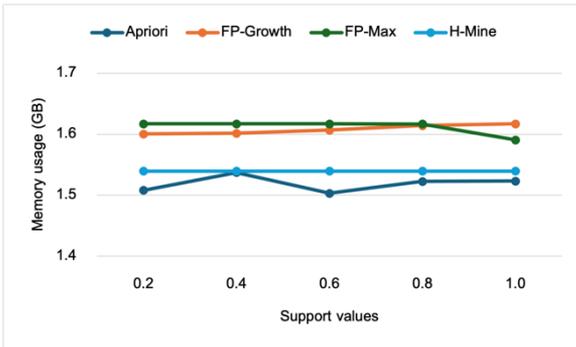


Figure 10 Comparison of memory usage and support values for 25,000 transaction records

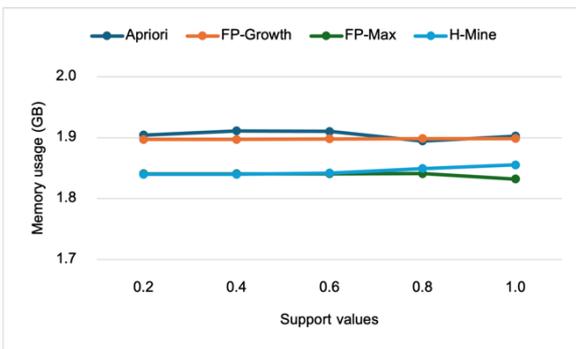


Figure 11 Comparison of memory usage and support values for 28,000 transaction records

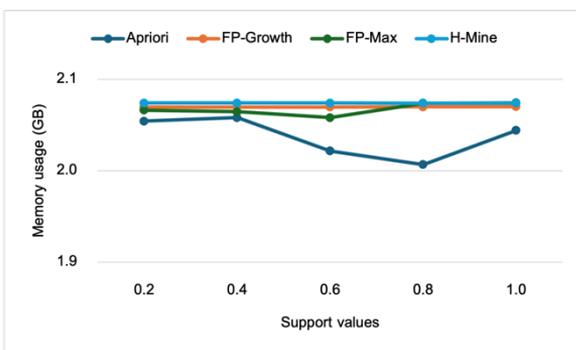


Figure 12 Comparison of memory usage and support values for 30,000 transaction records

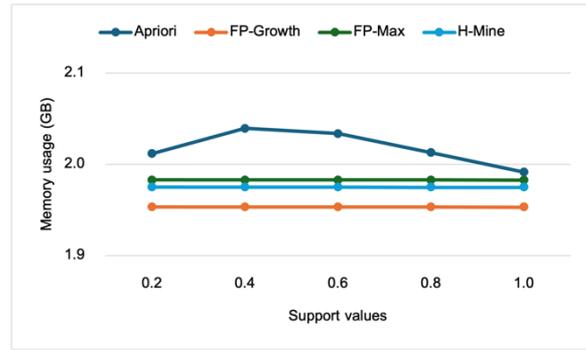


Figure 13 Comparison of memory usage and support values for 35,000 transaction records

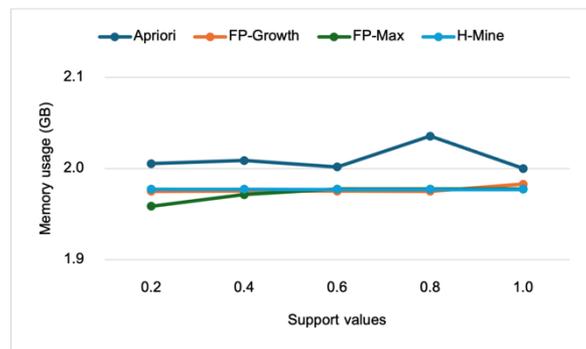


Figure 14 Comparison of memory usage and support values for 38,000 transaction records

จาก Figure 10-14 แสดงการเปรียบเทียบการใช้หน่วยความจำของอัลกอริทึม Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-mine บนชุดข้อมูล Transaction ขนาด 25,000 ถึง 38,000 รายการ โดยทดสอบที่ค่าสนับสนุน ตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.0 พบว่าปริมาณการใช้หน่วยความจำมีความแตกต่างกันในแต่ละอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึม H-mine และ FP-Max มีแนวโน้มใช้หน่วยความจำคงที่และน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น ในขณะที่อัลกอริทึม Apriori มีการใช้หน่วยความจำผันผวนและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดข้อมูลเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องสร้างและเก็บ Candidate itemsets จำนวนมาก ส่วนอัลกอริทึม FP-Growth ใช้หน่วยความจำค่อนข้างคงที่แต่มากกว่าอัลกอริทึม H-Mine และ FP-Max เล็กน้อย เนื่องจากต้องเก็บโครงสร้าง FP-Tree ทั้งหมดไว้ในหน่วยความจำ (Borah & Nath, 2021; Wicaksono et al., 2020)

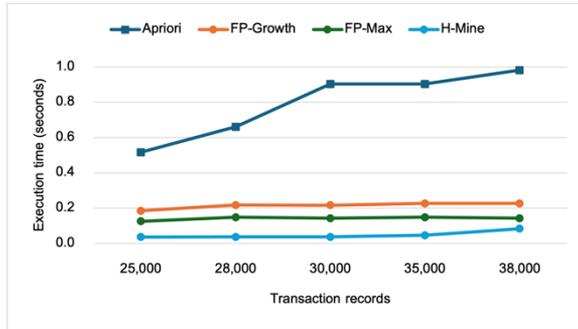


Figure 15 Comparison of execution time among association rule mining algorithms with different transaction records at support value = 0.2

จาก Figure 15 แสดงการเปรียบเทียบด้านเวลาประมวลผลกับจำนวนข้อมูล Transaction ของอัลกอริทึมทั้ง 4 ในการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ที่ค่า support เท่ากับ 0.2 พบว่าอัลกอริทึม H-Mine มีประสิทธิภาพดีที่สุด แม้ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางตรงกันข้ามอัลกอริทึม Apriori แสดงให้เห็นข้อจำกัดในการรับมือกับข้อมูลขนาดใหญ่อย่างชัดเจน โดยเวลาประมวลผลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับอัลกอริทึม FP-Growth และ FP-Max มีประสิทธิภาพปานกลางและรักษาเสถียรภาพได้ดี

จาก Figure 16 แสดงการเปรียบเทียบด้านการใช้หน่วยความจำกับจำนวนข้อมูล Transaction เผยให้เห็นพฤติกรรมที่น่าสนใจ โดยทุกอัลกอริทึมมีจุดเปลี่ยนสำคัญที่ 30,000 transactions ซึ่งเป็นจุดที่ใช้หน่วยความจำสูงสุด (ประมาณ 2.05-2.07 GB) จากนั้นการใช้หน่วยความจำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สังเกตได้ว่าอัลกอริทึม H-Mine แม้จะเริ่มต้นด้วยการใช้หน่วยความจำน้อยที่สุด แต่เมื่อข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้น การใช้หน่วยความจำของทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน

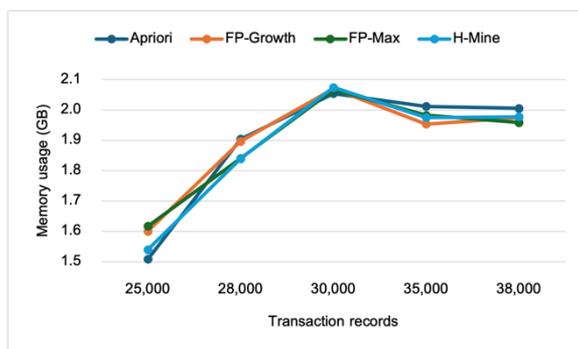


Figure 16 Comparison of memory usage among association rule mining algorithms with different transaction records at support value = 0.2

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของทั้ง 4 อัลกอริทึม พบว่าแต่ละอัลกอริทึมมีความเหมาะสมกับลักษณะข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยอัลกอริทึม H-Mine แสดงประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับข้อมูลขนาดใหญ่ (25,000-38,000 รายการ) และข้อมูลที่มีค่าสนับสนุนต่ำ (0.2-0.4) เนื่องจากใช้โครงสร้าง Hyperlink ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหา ทำให้เหมาะกับการประมวลผลแบบ real-time ส่วนอัลกอริทึม FP-Growth และ FP-Max เหมาะกับข้อมูลขนาดกลาง (25,000-30,000 รายการ) และข้อมูลที่มีรูปแบบการเกิดซ้ำสูง เนื่องจากใช้โครงสร้าง FP-Tree ในการบีบอัดข้อมูล โดย FP-Max จะมีประสิทธิภาพดีในกรณีที่ต้องการเฉพาะ maximal frequent itemsets ในขณะที่อัลกอริทึม Apriori เหมาะกับข้อมูลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 25,000 รายการ) ที่มีค่าสนับสนุนสูง (0.8-1.0) และมีรูปแบบซ้ำน้อย เนื่องจากการสแกนฐานข้อมูลหลายรอบจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในกรณีนี้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori, FP-Growth, FP-Max และ H-mine ในการค้นหาไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อยบนชุดข้อมูล Transaction ขนาด 25,000 ถึง 38,000 รายการ พบว่าอัลกอริทึม H-Mine มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่ โดยเฉพาะเมื่อต้องรับมือกับความท้าทายของ Big Data ทั้งด้านปริมาณข้อมูล (Volume) และความเร็วในการประมวลผล (Velocity)

ตามด้วยอัลกอริทึม FP-Growth และ FP-Max ที่ใช้โครงสร้าง FP-Tree ช่วยลดการสแกนฐานข้อมูล ในขณะที่อัลกอริทึม Apriori มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยเฉพาะเมื่อค่าสนับสนุนต่ำและข้อมูลขนาดใหญ่ เนื่องจากต้องสแกนฐานข้อมูลหลายรอบและสร้าง Candidate itemsets จำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวน Transaction ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาและหน่วยความจำที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกับอัลกอริทึม Apriori ในขณะที่ค่าสนับสนุนที่สูงขึ้นช่วยลดเวลาและหน่วยความจำที่ใช้ เนื่องจากมีไอเทมเซตที่เกิดขึ้นบ่อยน้อยลง

ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้อัลกอริทึม ควรพิจารณาจากลักษณะข้อมูลเป็นสำคัญ โดยข้อมูลขนาดใหญ่และต้องการประมวลผลรวดเร็วควรใช้ H-Mine ข้อมูลที่มีรูปแบบซ้ำสูงควรใช้ FP-Growth หรือ FP-Max และข้อมูลขนาดเล็กที่มีค่าสนับสนุนสูงสามารถใช้ Apriori ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาลักษณะข้อมูลก่อนเลือกใช้อัลกอริทึมจะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพสูงสุด

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา ได้แก่ (1) การทดลองใช้เพียงชุดข้อมูลร้านขายของชำเพียงชุดเดียว ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมลักษณะข้อมูลที่หลากหลายในธุรกิจค้าปลีกประเภทอื่น (2) การทดสอบจำกัดเฉพาะขนาดข้อมูลไม่เกิน 38,000 รายการ ซึ่งอาจไม่สะท้อนประสิทธิภาพการทำงานกับข้อมูลขนาดใหญ่มาก และ (3) การทดสอบอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่กำหนด ซึ่งประสิทธิภาพอาจแตกต่างกันในสภาพแวดล้อมอื่น

สำหรับข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้งาน ควรพิจารณาเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมตามข้อจำกัดด้านทรัพยากรและลักษณะการใช้งาน ดังนี้

กรณีระบบมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร อัลกอริทึม H-Mine เหมาะสำหรับระบบที่มีหน่วยความจำจำกัดแต่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบฝังตัว หรือแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพา เนื่องจากใช้หน่วยความจำน้อยที่สุดและมีความเร็วสูงสุด ส่วนอัลกอริทึม FP-Max เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับระบบที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บ เนื่องจากเก็บเฉพาะไอเทมเซตที่มีความสำคัญสูงสุด

กรณีระบบมีทรัพยากรเพียงพอ อัลกอริทึม FP-Growth เหมาะกับระบบที่มีหน่วยความจำเพียงพอและต้องการความเสถียรในการทำงาน เช่น ระบบวิเคราะห์ข้อมูลขององค์กรขนาดใหญ่ ส่วนอัลกอริทึม Apriori ควรใช้เฉพาะกับข้อมูลขนาดเล็กหรือในกรณีที่ต้องการความเข้าใจง่ายในการพัฒนาและบำรุงรักษาระบบ

สำหรับการวิจัยในอนาคตควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิคการจัดการหน่วยความจำแบบไดนามิกเพื่อรองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีทรัพยากรจำกัด และการศึกษาผลกระทบของปัจจัยอื่นๆ เช่น ความซับซ้อนของข้อมูล รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล และประสิทธิภาพการทำงานบนฮาร์ดแวร์ที่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

Adeniji, I. A., Saheed, Y. K., Oladele, T. O., & Braimah, J. O. (2015). Comparative analysis of association rule mining techniques for monitoring behavioural patterns of customers in a grocery store. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 13(1), 46–51.

Agrawal, R., & Srikant, R. (1994). Fast algorithms for mining association rules. In *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB)* (pp. 487–499). Morgan Kaufmann.

Borah, A., & Nath, B. (2021). Comparative evaluation of pattern mining techniques: An empirical study. *Complex & Intelligent Systems*, 7(2), 589–619. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00226-4>

Dedhia, H. (2022). *Groceries dataset* [Dataset]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/heeraldedhia/groceries-dataset/data>

Gandomi, A., & Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>

Garg, K., & Kumar, D. (2013). Comparing the performance of frequent pattern mining algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 69(25), 21–28. <https://doi.org/10.5120/12129-8502>

Grahne, G., & Zhu, J. (2003). High performance mining of maximal frequent itemsets. In *Proceedings of the 3rd SIAM International Conference on Data Mining* (pp. 135–143). SIAM.

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2006). *Data mining: Concepts and techniques* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.

Han, J., Pei, J., & Yin, Y. (2000). Mining frequent patterns without candidate generation. In *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (pp. 1–12). ACM. <https://doi.org/10.1145/342009.335372>

Mustakim, Herianda, D. M., Ilham, A., Daeng Gs, A., Laumal, F. E., Kurniasih, N., Iskandar, A., Manulangga, G., Indra Iswara, I. B. A., & Rahim, R. (2018). Market basket analysis using Apriori and FP-Growth for analysis consumer expenditure patterns at Berkah Mart in Pekanbaru Riau. *Journal of Physics: Conference Series*, 1114, 012131. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1114/1/012131>

Nigam, B., Nigam, A., & Dalal, P. (2017). Comparative study of top 10 algorithms for association rule mining. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 5(8), 190–195. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v5i8.190195>

Pei, J., Han, J., Lu, H., Nishio, S., Tang, S., & Yang, D. (2001). H-mine: Hyper-structure mining of frequent patterns in large databases. In *Proceedings 2001*

- IEEE International Conference on Data Mining* (pp. 441–448). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2001.989550>
- Raschka, S. (2018). MLxtend: Providing machine learning and data science utilities and extensions to Python's scientific computing stack. *Journal of Open Source Software*, 3(24), 638. <https://doi.org/10.21105/joss.00638>
- Slimani, T., & Lazzez, A. (2014). Efficient analysis of pattern and association rule mining approaches. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 6(3), 70–81. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2014.03.09>
- Wicaksono, D., Jambak, M. I., & Saputra, D. M. (2020). The comparison of Apriori algorithm with preprocessing and FP-Growth algorithm for finding frequent data pattern in association rule. In *Proceedings of the Sriwijaya International Conference on Information Technology and Its Applications (SICONIAN 2019)* (pp. 574–579). Atlantis Press.

การวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักเรียนต่อการจัดการเรียนการสอนโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล

Analyzing students' opinions on teaching and learning management using data mining techniques

ธนัทไชยพงษ์ เพชรสงคราม¹ และ วงกต ศรีอุไร^{2*}

Tanutchaipong Phetsongkram¹ and Wongkot Sriurai^{2*}

Received: 9 September 2024 ; Revised: 6 December 2024 ; Accepted: 22 January 2025

บทคัดย่อ

ในมหาวิทยาลัยการจัดการเรียนการสอนมีส่วนสำคัญต่อการเรียนรู้ของนักศึกษา การรับฟังความคิดเห็นของนักศึกษามีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพการจัดการเรียนการสอน ทำให้ผู้สอนสามารถปรับวิธีการสอน เนื้อหา หรือกิจกรรมให้เหมาะสมกับนักศึกษาได้ ในรายวิชาที่มีนักศึกษาจำนวนมาก การสรุปความคิดเห็นทั้งหมดเพื่อนำไปปรับปรุงการเรียนการสอนต้องใช้เวลาอันยาวนาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอน โดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล วิธีการศึกษามี 5 ขั้นตอน คือ 1) การรวบรวมข้อมูลความคิดเห็นของนักศึกษาจำนวน 3,000 ข้อความ 2) การเตรียมข้อมูล โดยการกลั่นกรองข้อความ และการตัดคำพร้อมเลือกคำสำคัญด้วยเทคนิค TF-IDF 3) การสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม 4 วิธี ได้แก่ Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (K-NN), Naive Bayes และ Random Forest เพื่อใช้จำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ และจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ เช่น อาจารย์ผู้สอน เนื้อหารายวิชา และสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ 4) การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่า accuracy, precision, recall, และ F1-score 5) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง จากผลการวิจัยพบว่าอัลกอริทึม SVM มีประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบมากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยของ accuracy, precision, recall, และ F1-score เท่ากับ 97.00%, 97.10%, 97.40% และ 97.30% ตามลำดับ สำหรับการจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ พบว่าอัลกอริทึม KNN มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของ accuracy, precision, recall, และ F1-score เท่ากับ 91.00%, 91.60%, 91.00% และ 91.10% ตามลำดับ แบบจำลองที่พัฒนาถูกนำไปสร้างเป็นเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาช่วยปรับปรุงคุณภาพการเรียนการสอนอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความคิดเห็น, การจัดการเรียนการสอน, การทำเหมืองข้อมูล

Abstract

In universities, the management of teaching and learning plays a crucial role in student learning. Gathering student feedback is important for improving the quality of teaching and learning, allowing instructors to adjust teaching methods, content, or activities to better suit students. In courses with a large number of students, summarizing all feedback for the purpose of improving teaching can be time-consuming. Therefore, this research aims to develop a model for analyzing student opinions on teaching and learning management using data mining techniques. The research methodology is divided into five steps: 1) Data collection of 3,000 student feedback messages. 2) Data preparation by filtering messages and performing word segmentation, along with selecting key terms using the TF-IDF technique.

¹ สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี 34190

² ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติ และคอมพิวเตอร์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี 34190

¹ Major of Information Technology, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

² Department of Mathematics Statistics and Computer, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

^{2*} Corresponding author, e-mail: wongkot.s@ubu.ac.th

3) Modeling to compare the performance of four algorithms: Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (K-NN), Naive Bayes, and Random Forest for classifying positive and negative opinions and categorizing feedback on various aspects such as instructors, course content, and learning support resources. 4) Model performance evaluation using accuracy, precision, recall, and F1-score, and 5) Model application. The research findings indicate that the SVM algorithm has the highest performance in classifying positive and negative opinions, with average values of accuracy, precision, recall, and F1-score at 97.00%, 97.10%, 97.40%, and 97.30%, respectively. For categorizing feedback on various aspects, the KNN algorithm demonstrated the best performance, with average values of accuracy, precision, recall, and F1-score at 91.00%, 91.60%, 91.00%, and 91.10, respectively. The developed model has been deployed as a web application to analyze student feedback, effectively enhancing the quality of teaching and learning management.

Keywords: Opinion analysis, teaching and learning management, data mining

บทนำ

การจัดการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยมีความสำคัญต่อการเรียนรู้ของนักศึกษา การรับฟังความคิดเห็นของนักศึกษาช่วยปรับปรุงคุณภาพการสอนและทำให้ผู้สอนสามารถปรับวิธีการสอนให้เหมาะสมกับนักศึกษาได้ โดยเฉพาะในรายวิชาที่มีนักศึกษาจำนวนมาก การสรุปความคิดเห็นทั้งหมดเพื่อปรับปรุงการสอนอาจใช้เวลานานและอาจเกิดข้อผิดพลาดในการประมวลผลความคิดเห็น เช่น การจัดประเภทผิดพลาดหรือการตีความข้อความที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งอาจเกิดจากการใช้เทคนิคที่ไม่เหมาะสมหรือการเลือกคำสำคัญผิดพลาด ความคิดเห็นของนักศึกษาเกี่ยวกับการจัดการเรียนการสอนส่วนใหญ่ถูกรวบรวมผ่านแบบสอบถาม การสัมภาษณ์ การวิเคราะห์ความคิดเห็นเหล่านี้ในระดับเชิงลึกเป็นเรื่องที่ท้าทาย เนื่องจากความคิดเห็นมีความหลากหลายและมีความซับซ้อน การใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นสามารถช่วยให้การตีความข้อมูลเชิงคุณภาพเป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการดำเนินงานได้ เช่น งานวิจัยของ วาฑิตย์ คำพรมมา และคณะ (2562) ได้พัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ความรู้สึกแบบผสมสำหรับความคิดเห็นที่มีต่อโรงแรมในประเทศไทย โดยใช้ K-means และ K-Nearest Neighbors งานวิจัยนี้ได้รวบรวมความคิดเห็นจากเว็บไซต์ APT TUBE โดยนำความคิดเห็นมาวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค K-means ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มได้แก่ การเข้าถึง กิจกรรมและความบันเทิง อาหารและเครื่องดื่ม พนักงานผู้ให้บริการ และสถานที่ จากนั้นจึงนำข้อความแต่ละกลุ่มมาแยกประเภทด้วยเทคนิค K-Nearest Neighbors (K-NN) ผลการวิจัยพบว่า เทคนิคที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดคือ เทคนิค K-means ร่วมกับ K-NN ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 94.80% ส่วนงานวิจัยของ วสวัตต์ อินทร์แปลง และจारी ทองคำ (2563) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ความคิดเห็นต่อเกมมือถือพีจีด้วยเหมืองข้อความ

มุ่งเน้นที่ใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้เล่นเกมมือถือ Player Unknown's Battlegrounds ซึ่งเป็นเกมยอดนิยม การวิเคราะห์ความคิดเห็นอาจเผยให้เห็นข้อดีข้อเสียของเกม ความต้องการของผู้เล่น และปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อทำการทดสอบและวัดประสิทธิภาพของตัวแบบ พบว่าเทคนิค K-Nearest Neighbor ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์ความคิดเห็น โดยให้ค่าความแม่นยำ 99.75% ค่าความระลึก 100% และค่าความถูกต้อง 99.87% และในงานวิจัยของ Rahat *et al.* (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความคิดเห็น (Sentiment Analysis) โดยเน้นการใช้สื่อสังคมออนไลน์เป็นแหล่งข้อมูลในการรวบรวมความคิดเห็นของผู้คนเกี่ยวกับหัวข้อที่หลากหลาย เช่น การเมือง เศรษฐกิจ และมนุษยธรรม งานวิจัยนี้ได้นำวิธี Support Vector Machine (SVM) และ Naive Bayes มาเปรียบ เทียบประสิทธิภาพ เพื่อจำแนกความคิดเห็นว่าเป็นเชิงบวก เชิงลบ หรือเป็นกลาง ผลการวิจัยพบว่าวิธี SVM ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 82.48% ซึ่งสูงกว่าวิธี Naive Bayes

จากความเป็นมาและการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนของผู้สอน โดยผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นจะทำให้ผู้สอนทราบว่านักศึกษามีความคิดเห็นอย่างไรต่อการจัดการเรียนการสอน จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปพัฒนาเป็นระบบต้นแบบวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอน โดยผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นจะนำเสนอใน 2 ประเด็น ได้แก่ ความคิดเห็นดังกล่าวเป็นเชิงบวกหรือเชิงลบ และมีการแบ่งประเภทของความคิดเห็นว่าเป็นเชิงบวกด้านใดหรือเป็นเชิงลบด้านใด เพื่อที่ผู้สอนจะได้นำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงการสอน หรือจัดการเรียนการสอนให้ดียิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนโดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การวิเคราะห์เหมืองความคิดเห็น

การวิเคราะห์เหมืองความคิดเห็น (Opinion Mining) เป็นสาขาย่อยของการวิเคราะห์ข้อมูลที่มุ่งเน้นการศึกษาความคิดเห็นของผู้ใช้ที่มีต่อประสบการณ์ต่างๆ โดยปกติจะทำการตรวจสอบความรู้สึก (Sentiment Analysis) หรือทัศนคติของผู้คนที่แสดงออกผ่านข้อความ ซึ่งอาจเป็นในรูปแบบของบทความ รีวิว ความคิดเห็นในสื่อสังคมออนไลน์ (กานดา แผ้ววัฒนากุล และปราโมทย์ ลือนาม, 2556) กระบวนการในการวิเคราะห์เหมืองความคิดเห็น ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังนี้

1.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

รวบรวมข้อมูลความคิดเห็นจากแหล่งต่าง ๆ เช่น รีวิวออนไลน์ ความคิดเห็นจากผู้ใช้ หรือโพสต์ในโซเชียลมีเดีย เป็นต้น

1.2 การเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

ดำเนินการกลั่นกรองข้อมูลโดยการลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องออก และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

1.3 การตัดคำ (Tokenization) แยกข้อความ

ออกเป็นหน่วยที่เล็กลงเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย

1.4 การกำจัดคำหยุด (Stop Words Removal)

ลบคำที่ไม่จำเป็นเพื่อให้การวิเคราะห์มุ่งเน้นไปที่คำที่สำคัญ

1.5 การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis)

ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อวิเคราะห์และจำแนกความคิดเห็นเป็นเชิงบวกหรือเชิงลบ

1.6 การสร้างตัวแทนเอกสาร (Document Representation)

แปลงข้อมูลความคิดเห็นเป็นเวกเตอร์ที่สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองได้ เช่น การแทนค่าคำด้วยค่าความถี่ของคำ-ค่าส่วนกลับความถี่เอกสารที่เกิดคำ (Term Frequency – Inverse Document Frequency: TF-IDF) ซึ่ง TF-IDF เป็นวิธีการที่ใช้ในการสร้างตัวแทนเอกสาร เทคนิคนี้มีเป้าหมายหลักเพื่อวัดความสำคัญของคำในเอกสารภายในชุดข้อมูลของเอกสาร โดยพิจารณาทั้งความถี่ของคำในเอกสารนั้น ๆ และความถี่ของคำในชุดเอกสารทั้งหมด (กานดา แผ้ววัฒนากุล และปราโมทย์ ลือนาม, 2556; Chanakot & Sanrach, 2024) รายละเอียดสมการในการคำนวณดังนี้

$$tf_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_k n_{kj}} \quad (1)$$

โดยที่ n_{ij} คือความถี่ของคำ t_i ในข้อความ D
 $\sum_k n_{kj}$ คือผลรวมของความถี่ของคำทั้งหมดที่ปรากฏในข้อความ D

$$idf_i = \log \frac{n_{ij}}{|\{j:t_i \in d_j\}|} \quad (2)$$

โดยที่ $|D|$ คือจำนวนคำทั้งหมดในชุดข้อมูล และ $|\{j:t_i \in d_j\}|$ คือจำนวนเอกสารที่คำ t_i ปรากฏในชุดข้อมูลทั้งหมด

$$TF - IDF = tf_{ij} \times idf_i \quad (3)$$

2. เทคนิค Support Vector Machine (SVM)

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่นิยมใช้ในการจัดประเภทและการถดถอย ซึ่งมีหลักการทำงานพื้นฐานคือการหาพื้นที่ที่ดีที่สุด (hyperplane) ที่แบ่งแยกกลุ่มข้อมูลออกจากกันด้วยระยะห่างที่มากที่สุด ซึ่งทำให้การจำแนกประเภทมีความแม่นยำสูง โดย SVM มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีผ่านการใช้เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) เพื่อแปลงข้อมูลไปยังมิติที่สูงขึ้น (สุพัตรา วิริยะวิสุทธิสกุล และคณะ, 2559)

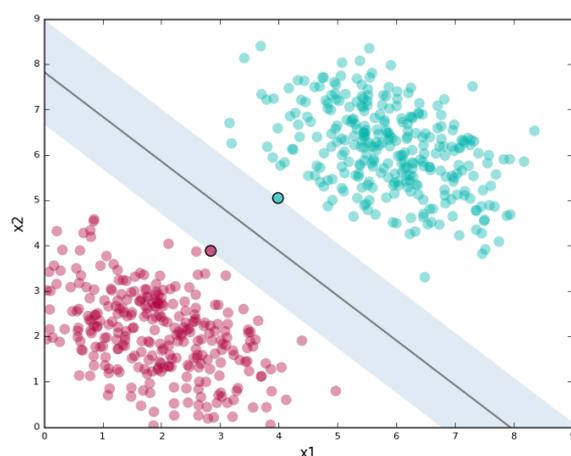


Figure 1 Example Support Vector Machine's Decision Plane

3. เทคนิค K-Nearest Neighbors (K-NN)

เพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (K-Nearest Neighbor: KNN) เป็นวิธีการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้สำหรับการจำแนก

ประเภทและการพยากรณ์ โดยพื้นฐานแล้ว KNN จะจำแนกข้อมูลโดยการพิจารณาค่าของ K เพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) ในพื้นที่ของคุณลักษณะข้อมูล เพื่อระบุประเภทของข้อมูลที่ต้องการจำแนกหรือคาดการณ์ค่า วิธีนี้ทำงานโดยการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดข้อมูล และกำหนดประเภทหรือค่าตามจำนวนมากที่สุดของเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด วิธีการทำงานของ KNN สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างข้อมูลโดยใช้วิธี ยูคลิดีเนียน (Euclidean distance) เพื่อวัดความคล้ายคลึงระหว่างจุดข้อมูลที่ไม่รู้ประเภทกับจุดข้อมูลที่มีประเภทอยู่แล้ว การคัดเลือกเพื่อนบ้าน ค้นหา K จุดข้อมูลที่ใกล้ที่สุด การตัดสินใจ กำหนดประเภทหรือค่าของจุดข้อมูลตามประเภทหรือค่าที่เป็นที่นิยมที่สุดในกลุ่ม K เพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (พิชญะ พรหมลา และจรัญ แสงราช, 2563)

4. เทคนิค Random Forest (RF)

Random Forest เป็นการสร้างชุดของ Decision Trees หลายๆ ต้น โดยใช้เทคนิคการสุ่มข้อมูล (randomness) ทั้งในกระบวนการสร้างข้อมูลฝึกและในกระบวนการเลือกคุณลักษณะ (features) เพื่อการแบ่งข้อมูลในแต่ละต้นไม้ในป่า โดยแต่ละ Decision Tree จะทำการทำนายผลและ Random Forest จะใช้การโหวต (voting) หรือการคำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละต้นไม้เพื่อให้ได้การทำนายสุดท้าย กระบวนการทำงาน Random Forest ประกอบไปด้วยขั้นตอนการสร้างชุดข้อมูลฝึกโดยการสุ่ม (Bootstrap Sampling) การสุ่มตัวอย่างข้อมูลจากชุดข้อมูลฝึก (training dataset) โดยการเลือกตัวอย่างแบบสุ่ม (sampling with replacement) จากข้อมูลทั้งหมด และสร้างชุดข้อมูลที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละการสุ่ม การสร้าง Decision Trees สำหรับแต่ละชุดข้อมูลที่สุ่มมานั้น จะสร้าง Decision Tree โดยแต่ละต้นไม้จะทำการตัดสินใจจากคุณลักษณะต่างๆ ที่ถูกสุ่มเลือก ซึ่งเป็นกระบวนการที่แตกต่างจาก Decision Trees แบบธรรมดาที่เลือกคุณลักษณะที่ดีที่สุดในการตัดสินใจที่แต่ละ node การทำนายผลจากหลายต้นไม้ เมื่อทุกๆ ต้นไม้ในป่า Random Forest ทำการทำนายผลแล้ว จะมีการรวมผลจากทุกๆ ต้นไม้ โดยการโหวตสำหรับปัญหาการจำแนกประเภท หรือการคำนวณค่าเฉลี่ยสำหรับปัญหาการทำนายค่าเชิงปริมาณ (Rahat *et al.*, 2019)

5. เทคนิค Naive Bayes

Naive Bayes เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้หลักการของทฤษฎีความน่าจะเป็น (probability theory) สำหรับการจำแนกประเภท (classification) โดยอาศัยการสมมติว่าคุณลักษณะ (features) ที่ใช้ในการทำนายแต่ละตัว

จะเป็นอิสระจากกัน (independent) ซึ่งเป็นสมมติฐานที่เรียกว่า naive assumption หรือ “สมมติฐานที่เรียบง่าย” หลักการของ Naive Bayes ใช้ ทฤษฎีของเบย์ (Bayes' Theorem) ซึ่งคำนวณความน่าจะเป็นหลัง (posterior probability) ของการจำแนกประเภท (class) ตามคุณลักษณะ (features) ที่มีทฤษฎีของเบย์สามารถเขียนได้เป็น

$$P(C|X) = \frac{P(X|C)P(C)}{P(X)} \quad (4)$$

โดยที่

$P(C|X)$ คือความน่าจะเป็นของการจำแนกประเภท

C เมื่อมีคุณลักษณะ X

$P(X|C)$ คือความน่าจะเป็นของคุณลักษณะ

X ภายใต้การจำแนกประเภท C

$P(C)$ คือความน่าจะเป็นของการจำแนกประเภท C

$P(X)$ คือความน่าจะเป็นของคุณลักษณะ X

Naive Bayes มีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับการกระจายของข้อมูล Gaussian Naive Bayes เหมาะสำหรับการใช้งานกับข้อมูลที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous data) โดยสมมติว่าข้อมูลในแต่ละคลาสมีการกระจายแบบปกติ (normal distribution) Multinomial Naive Bayes ใช้สำหรับข้อมูลที่เป็นจำนวนเต็ม เช่น จำนวนครั้งที่คำปรากฏในเอกสาร จำนวนครั้งที่เกิดเหตุการณ์เป็นต้น และ Bernoulli Naive Bayes ทำงานได้ดีกับข้อมูล Binary หรือ Boolean (Zhang *et al.*, 2021)

6. การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองสามารถหาได้จาก Confusion Matrix ตารางที่ใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการจำแนกประเภทข้อมูล โดยแสดงผลลัพธ์ที่คาดการณ์จากแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง (True values) (วาทิตย์ คำพรมมา และคณะ, 2562; Gaye & Wulamu, 2019)

Table 1 Confusion matrix

actual class	Predict class	
	class=Yes	class=No
class=Yes	TP	FN
class=No	FP	TN

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

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

$$F1 - score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (8)$$

โดยที่

True Positives (TP) หมายถึง การทำนายและผลลัพธ์จริงตรงกัน คือทั้งสองอย่างเป็น Yes

True Negatives (TN) หมายถึง การทำนายเป็น No และผลลัพธ์จริงเป็น No

False Positives (FP) หมายถึง การทำนายเป็น Yes แต่ผลลัพธ์จริงเป็น No

False Negatives (FN) หมายถึง การทำนายเป็น No แต่ผลลัพธ์จริงเป็น Yes

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีกระบวนการทำวิจัย 5 ขั้นตอน คือ (1) การเก็บรวบรวมข้อมูล (2) การเตรียมข้อมูล (3) การสร้างแบบจำลอง (4) การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง และ (5) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง มีรายละเอียดดังนี้

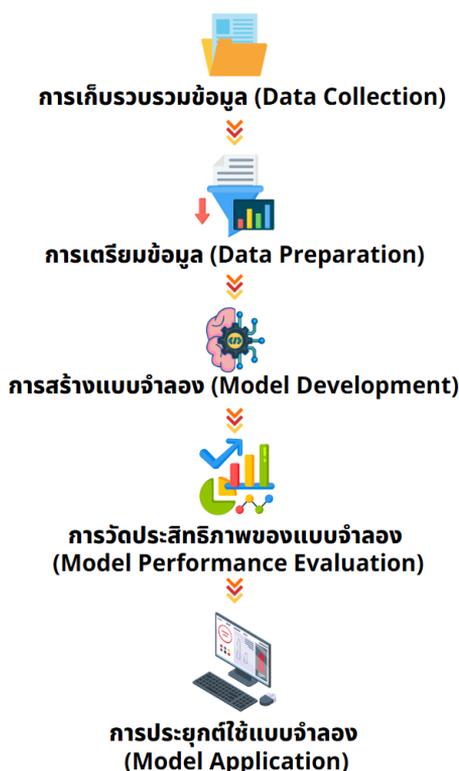


Figure 2 Research Process

การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

การเก็บรวบรวมข้อมูล เกี่ยวกับความคิดเห็นของนักศึกษาเกี่ยวกับการจัดการเรียนการสอนที่มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยข้อมูลถูกเก็บรวบรวมจากกองบริการการศึกษาในช่วงปีการศึกษา 2560-2564 รวมทั้งหมด 3,000 ความคิดเห็น ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิจัยได้ผ่านการขอจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเรียบร้อยแล้ว มีเลขที่การรับรอง UBU-REC-137/2567 โดยตัวอย่างของข้อมูลดัง Table 2

Table 2 Example of comment (CSV file)

No.	Comment
1	ผมว่าอาจารย์สอนดีมากเลยครับ / สอนเข้าใจง่าย
2	อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มาก ! กว่านี้
3	อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มากกว่านี้ +++
...	...

2. การเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

2.1 การกลั่นกรองข้อมูล (Data Cleaning) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการเตรียมข้อมูล (Data Preparation) เพื่อให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ในการกลั่นกรองข้อมูล มีการดำเนินการ คือ ปรับแก้ค่าที่ผิดพลาดในข้อความให้ถูกต้องตามพจนานุกรม กำจัดข้อมูลที่ไม่จำเป็น กำจัดตัวเลข ตัวอักษรภาษาอังกฤษ สัญลักษณ์ และช่องว่างที่ไม่จำเป็นออกจากข้อความ และกรองข้อมูลเฉพาะที่เป็นภาษาไทย หลังจากกระบวนการกลั่นกรองข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จะเหลือความคิดเห็นจำนวน 2,254 ข้อความ จาก 3,000 ข้อความ ตัวอย่างของข้อมูลที่ผ่านการกลั่นกรองข้อมูลแล้ว ดัง Table 3

Table 3 Example of comments after deleting special character

original sentence	The last sentence deletes the special characters
ผมว่าอาจารย์สอนดีมากเลยครับ / สอนเข้าใจง่าย	ผมว่าอาจารย์สอนดีมากเลยครับสอนเข้าใจง่าย
อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มาก ! กว่านี้	อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มากกว่านี้
อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มากกว่านี้ +++	อยากให้เพิ่มในส่วนของวิชาการให้มากกว่านี้

2.2 การตัดคำและกำจัดคำหยุด (Stop Words Removal) หลังจากการกรองข้อมูลเสร็จสิ้น ข้อมูลจะได้รับการตัดคำและกำจัดคำหยุดโดยใช้เครื่องมือใน Visual Studio Code และโมดูล PyThaiNLP สำหรับการประมวลผลภาษาไทย ตัวอย่างผลลัพธ์จากกระบวนการนี้จะแสดงใน Table 4 และ Table 5

Table 4 Examples of words segmentation

No.	Review
1	ผม ว่า อาจารย์ สอน ดี มาก เลย ครับ สอน เข้าใจ ง่าย
2	อยาก ให้ เพิ่ม ใน ส่วน ของ วิชาการ ให้ มาก กว่า นี้
3	อุปกรณ์ สนับสนุน เรียน ไม่ดี แะ มาก

Table 5 Examples of stop words remove

No.	Review
1	อาจารย์ สอน ดี สอน เข้าใจ ง่าย
2	อยาก เพิ่ม วิชาการ
3	อุปกรณ์ สนับสนุน เรียน ไม่ดี แะ

2.3 การเลือกเฉพาะคำที่มีความหมาย หลังจากการตัดคำและกำจัดคำหยุดแล้ว จะได้คำทั้งหมดจำนวน 1,254 คำ จากนั้นจะนำคำแต่ละคำมาจัดประเภทตามพจนานุกรมโดยใช้พจนานุกรมอิเล็กทรอนิกส์ฉบับราชบัณฑิตยสถานและพจนานุกรมของ NECTEC ตัวอย่างกระบวนการนี้จะถูกแสดงใน Table 6

Table 6 Examples of words types

Rows	Word	Type	Notice
1	อาจารย์	n	คำนาม
2	สนุก	adv	คำวิเศษณ์
3	ชอบ	v	คำกริยา
4	ไม่ดี	adv	คำวิเศษณ์
5	สอน	v	คำกริยา

2.4 การจัดกลุ่มคำบ่งชี้คุณลักษณะ หลังจากได้ 1,254 คำ ในข้อ 2.3 แล้ว นำคำเหล่านี้มาผ่านการตัดคำเพิ่มเติม พบว่ามีคำที่เกี่ยวข้องกับ การจัดการเรียนการสอน จำนวน 295 คำ ซึ่งถือเป็นคำที่มีความหมายเฉพาะเจาะจงและสอดคล้องกับบริบทของงานวิจัย คำเหล่านี้ถูกตรวจสอบและจัดกลุ่มโดยผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาไทยจำนวน 4 ท่าน เพื่อจัดหมวดหมู่คำบ่งชี้คุณลักษณะตามบริบทของการเรียนการสอน โดยแบ่งกลุ่มคำเป็นดังนี้

- คำบ่งชี้คุณลักษณะเชิงบวก จำนวน 59 คำ
- คำบ่งชี้คุณลักษณะเชิงลบ จำนวน 55 คำ
- คำบ่งชี้ด้านอาจารย์ผู้สอน จำนวน 43 คำ
- คำบ่งชี้ด้านเนื้อหาทฤษฎีวิชา จำนวน 51 คำ
- คำบ่งชี้ด้านสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ จำนวน 47 คำ
- คำที่ไม่บ่งชี้คุณลักษณะ จำนวน 40 คำ

งานวิจัยนี้ทำการตัดคำที่ไม่สามารถบ่งชี้คุณลักษณะได้ออกจำนวน 40 คำ เหลือเพียงคำที่สามารถบ่งชี้คุณลักษณะจำนวน 255 คำ

2.5 วิธีการสร้างตัวแทนเอกสาร

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการ TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) เพื่อสร้างเวกเตอร์ตัวแทนเอกสาร โดยนับความถี่ของคำบ่งชี้แต่ละคำในเอกสาร จากนั้นคำนวณ TF-IDF และแทนค่าคำที่ไม่ปรากฏในเอกสารด้วยค่า 0

2.5.1 การเปรียบเทียบความถี่ของคำบ่งชี้เพื่อกำหนดประเภทความคิดเห็นเชิงบวก และเชิงลบ มีรายละเอียดดังนี้

ถ้าความถี่ของคำบ่งชี้ความคิดเห็นเชิงบวกมากกว่าความถี่ของคำบ่งชี้ความคิดเห็นเชิงลบ ให้คลาสเป็นความคิดเห็นเชิงบวก (Pos) ถ้าความถี่ของคำบ่งชี้ความคิดเห็นเชิงลบมากกว่าความถี่ของคำบ่งชี้ความคิดเห็นเชิงบวก ให้คลาสเป็นความคิดเห็นเชิงลบ (Neg) ตัวอย่างแสดงใน Table 7

Table 7 Examples of TF-IDF results with Class Pos or Neg

Rows	Boring	Easy to understand	Like	Angry	Class
1	0	0	0	0.066	Neg
2	0	0.211	0.102	0.079	Pos
3	0	0.181	0	0	Pos
4	0	0.090	0.020	0.099	Pos
5	0.249	0	0.046	0	Neg
6	0	0	0.033	0.082	Neg
7	0	0.158	0	0	Neg
8	0.057	0.974	0.044	0	Pos
9	0.083	0	0	0	Neg
10	0	0.140	0.092	0	Pos

จากใน Table 7 จากความคิดเห็นทั้งหมดจำนวน 3,000 ข้อความ แบ่งเป็นคลาส Pos จำนวน 1,292 ระเบียบ (record) และแบ่งเป็นคลาส Neg จำนวน 962 ระเบียบ ส่วน

ที่ไม่สามารถระบุได้ มีจำนวน 746 ระเบียบ ถูกตัดออก

2.5.2 การเปรียบเทียบความถี่ของคำบ่งชี้เพื่อ

กำหนดประเภทความคิดเห็นด้านอาจารย์ผู้สอน ด้านเนื้อหาวิชา และด้านสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้อาจมีรายละเอียดดังนี้

ถ้าความถี่ของคำบ่งชี้ด้านอาจารย์ผู้สอนมากกว่าด้านเนื้อหาวิชาและด้านสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้อาจมีรายละเอียดดังนี้ (Class A) ถ้าความถี่ของคำบ่งชี้ด้านเนื้อหาวิชามากกว่าด้านอาจารย์ผู้สอนและด้านสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้อาจมีรายละเอียดดังนี้ (Class B) ถ้าความถี่ของคำบ่งชี้ด้านสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้อาจมีรายละเอียดดังนี้ (Class C) ตัวอย่างแสดงใน Table 8

Table 8 Examples of TF-IDF results with Class A, B, and C

Rows	Teach	Teacher	Classroom	Content	Class
1	0	0	0	0.043	B
2	0	0	0.024	0	C
3	0.041	0.032	0	0	A
4	0	0	0.213	0	C
5	0.011	0	0	0.020	B
6	0.024	0.034	0	0	A
7	0.042	0	0	0.046	B
8	0.066	0.039	0	0	A
9	0	0	0.341	0	C
10	0	0.252	0	0.035	A

จากใน Table 8 จากความคิดเห็นทั้งหมดจำนวน 3,000 ข้อความ แบ่งเป็นคลาส A มีจำนวน 841 ระเบียบ คลาส B มีจำนวน 819 ระเบียบ และคลาส C มีจำนวน 594 ระเบียบ ข้อมูลจากใน Table 7 และ Table 8 ที่จะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ความคิดเห็นจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ .CSV โดยแบ่งเป็นสองไฟล์ ไฟล์ที่ใช้สำหรับระบุคลาส Pos / Neg และไฟล์ที่ใช้สำหรับระบุด้านต่าง ๆ ดัง Figure 3

Figure 3 File CSV which will be used for building a sentiment analysis model

3. การสร้างแบบจำลอง (Model Development)

การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือคือโปรแกรม Visual Studio Code และภาษาการเขียนโปรแกรม Python โดยมีรายละเอียดดังนี้ สร้างแบบจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม SVM, KNN, Naive Bayes และ Random Forest สำหรับการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ และจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ โดยเทคนิค SVM จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่า C: กำหนดค่าตั้งแต่ 500, 1000 และ 1500 ค่า Kernel: ใช้ค่า Linear งานวิจัยนี้เลือกใช้ Kernel คือ Linear เนื่องจากเหมาะกับข้อมูลที่ใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงเส้น และไม่ต้องการความซับซ้อนเกินไปในการแยกแยะข้อมูล สำหรับการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิค KNN มีการปรับสเกลข้อมูลก่อนการใช้งานโดยใช้ StandardScaler มีการปรับค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่า K ซึ่งเป็นจำนวนของเพื่อนบ้านที่ใช้ในการตัดสินใจ จะกำหนดค่าไว้ที่ 3, 4 และ 5 สำหรับการเลือก Weight ของ K-NN งานวิจัยนี้เลือกใช้ Distance Weight เนื่องจากข้อมูลในแต่ละคลาสมีจำนวนแตกต่างกัน การใช้ Distance Weight จะช่วยให้จุดข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมีอิทธิพลในการทำนายมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแม่นยำในการจำแนกความคิดเห็นในแต่ละคลาส ส่วนของการสร้างแบบจำลอง Naive Bayes ใช้โมเดล MultinomialNB สำหรับข้อมูลจำแนกประเภท และการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิค Random Forest ใช้การตั้งค่าพารามิเตอร์ จำนวนต้นไม้ (n_estimators) กำหนดค่าที่ 100, 200 และ 300 ความลึกสูงสุดของต้นไม้ (max_depth) กำหนดใช้ค่าอัตโนมัติ ในกระบวนการนี้จะมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างแบบจำลองแต่ละเทคนิค และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองในการวิเคราะห์ความคิดเห็น

4. การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Model Performance Evaluation)

การวิจัยนี้ใช้วิธีการแบ่งข้อมูลแบบ Split โดยมี การแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลฝึกสอน (Training) 90% เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง และข้อมูลชุดทดสอบ (Testing) 10% โดยมีการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง 4 ค่า ได้แก่ accuracy, precision, recall และ F1-score

5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Model Application)

การวิจัยครั้งนี้ได้นำแบบจำลองที่ให้ค่าประสิทธิภาพ ที่ดีที่สุดไปพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อทดสอบการใช้งาน แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนของอาจารย์ โดยผู้วิจัยใช้ Visual Studio Code Python พัฒนาในส่วนเว็บแอปพลิเคชัน

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล

การวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม SVM, KNN, Naive Bayes และ Random Forest สำหรับการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ และสำหรับจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ โดยจาก Table 9 ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง SVM ให้ ประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ มากที่สุด โดยมีค่าพารามิเตอร์ C = 1500 มีค่า accuracy เท่ากับ 97.00% precision เท่ากับ 97.10%, recall เท่ากับ 97.40% และ F1-score เท่ากับ 97.30% จาก Table 10 ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง KNN ให้ ประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ โดยค่า พารามิเตอร์ K = 3 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่า accuracy เท่ากับ 91.00% precision เท่ากับ 91.60% recall เท่ากับ 91.00% และ F1-score เท่ากับ 91.10% โดยผลลัพธ์ใน Table 9 และ Table 10 ค่า precision, recall, และ F1-score เป็นค่า

เฉลี่ยของทุกคลาส

Table 9 Comparison of Positive and Negative Sentiment Types

Model	Settings	Precision (%)	Recall (%)	Accuracy (%)	F1-Score (%)
SVM	C=500	95.40	95.30	95.20	95.10
	C=1000	93.60	98.40	95.40	95.40
	C=1500	97.10	97.40	97.00	97.30
KNN	K=3	95.90	95.90	95.90	95.90
	K=4	94.80	94.50	94.50	94.60
	K=5	94.70	94.50	94.50	94.50
Naive Bayes	MultinomialNB	76.30	58.80	58.80	46.40
Random Forest	n_estimators = 100	93.00	92.90	92.90	92.90
	n_estimators = 200	92.80	92.60	92.60	92.60
	n_estimators = 300	92.30	92.20	92.20	92.10

Table 10 Comparison of the Types of Feedback on Instructor, Course Content, and Learning Support

Model	Settings	Precision (%)	Recall (%)	Accuracy (%)	F1-score (%)
SVM	C=500	90.10	89.90	89.90	89.90
	C=1000	90.10	89.90	89.90	89.90
	C=1500	89.90	89.80	89.80	89.80
KNN	K=3	91.60	91.00	91.00	91.10
	K=4	90.00	89.50	89.50	88.20
	K=5	89.60	89.10	89.10	89.30

Table 10 Comparison of the Types of Feedback on Instructor, Course Content, and Learning Support (continue)

Naive Bayes	Multinomial NB	66.50	73.20	73.20	67.60
Random Forest	n_estimators = 100	81.20	81.10	81.10	80.90
	n_estimators = 200	81.40	81.40	81.40	81.20
	n_estimators = 300	81.80	81.80	81.80	81.60

2. ผลการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน

การวิจัยครั้งนี้ได้นำแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดไปใช้งานโดยการพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนของอาจารย์ มีประโยชน์หลายประการ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเรียนการสอน และส่งผลดีต่อการพัฒนาคุณภาพการศึกษา อาจารย์สามารถใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาเพื่อปรับปรุงการสอนในด้านต่าง ๆ เช่น การจัดการเนื้อหา หรือการปรับปรุงวิธีการสอนให้ตรงตามความต้องการของนักศึกษา และการจำแนกความคิดเห็นเป็นเชิงบวกและเชิงลบช่วยให้เห็นภาพรวมของการตอบรับจากนักศึกษาโดยขั้นตอนการใช้งานแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1) ให้ผู้ใช้กรอกข้อความที่ต้องการวิเคราะห์ความคิดเห็น จากนั้นคลิกที่ Submit เพื่อระบบจะทำการวิเคราะห์ข้อความ ใน Figure 4 และ 2) แสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อความจะปรากฏที่ผลการวิเคราะห์ ใน Figure 5

ระบบวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอน

กรอกข้อความแสดงความคิดเห็น

SUBMIT

ผลการวิเคราะห์ : >>

Figure 4 A screen where users can enter comments, suggestions, or feedback

ระบบวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอน

อาจารย์ที่ทักสอนเข้าใจอาจารย์เป็นคนดีมากสอนเข้าใจขอบเขตอาจารย์เป็นคนตรงเวลาและมีเหตุผล

SUBMIT

ผลการวิเคราะห์ : >>

- มีความเข้าใจเป็นจุดสังเกตการตัดสินใจ (Positive)
- ด้านอาจารย์สอน

Figure 5 Display the results of the analysis of student feedback on teaching and learning management

3. ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้เว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษา

จากการสัมภาษณ์อาจารย์ผู้สอนจำนวน 4 ท่าน เกี่ยวกับการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันใน 2 ด้าน มีรายละเอียดดังนี้

ในด้านการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อจำแนกความคิดเห็นที่เป็นเชิงบวกและเชิงลบ และจำแนกความคิดเห็นในด้านต่าง ๆ อาจารย์ผู้สอนพึงพอใจในความแม่นยำของการวิเคราะห์ความคิดเห็น โดยกล่าวว่า เว็บแอปพลิเคชันสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และช่วยให้สามารถระบุด้านต่าง ๆ เช่น อาจารย์ผู้สอน เนื้อหารายวิชา และสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ได้อย่างชัดเจน ความคิดเห็นเพิ่มเติม คือ การจำแนกข้อมูลช่วยประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาได้มาก และผลลัพธ์สามารถนำไปใช้ปรับปรุงการเรียนการสอนได้

ในด้านการใช้งาน อาจารย์ผู้สอนแสดงความคิดเห็นว่าเว็บแอปพลิเคชันใช้งานง่าย และมีคำแนะนำการใช้งานที่ชัดเจนในแต่ละขั้นตอน

สรุปผลการประเมินความพึงพอใจ อาจารย์ผู้สอนมีความพึงพอใจต่อเว็บแอปพลิเคชันในระดับมาก โดยเว็บแอปพลิเคชัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาและสนับสนุนการปรับปรุงการจัดการเรียนการสอนได้อย่างดี ทั้งนี้ขอเสนอแนะในการปรับปรุงการใช้งาน เช่น การเพิ่มความสามารถในการปรับแต่งการแสดงผลข้อมูลควรนำไปพิจารณาในอนาคตเพื่อเพิ่มความสะดวก และประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนของอาจารย์ โดยใช้เทคนิคการเหมืองข้อมูล โดยการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ในส่วนแรก ได้มีการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ และสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นในด้านต่าง ๆ เช่น อาจารย์ผู้สอน เนื้อหารายวิชา และสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพใน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ SVM, KNN, Naive Bayes และ Random Forest และในส่วนที่สองของการวิจัย ได้นำแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดไปใช้ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อทดสอบการใช้งานแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนของอาจารย์

โดยผลการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้ ส่วนแรก การสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ และสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกความคิดเห็นในด้านต่าง ๆ เช่น

อาจารย์ผู้สอน เนื้อหารายวิชา และสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ พบว่าเทคนิค SVM มีประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของ accuracy, precision, recall, และ F1-score เท่ากับ 97.00%, 97.10%, 97.40% และ 97.30% สำหรับการจำแนกความคิดเห็นในด้านต่างๆ พบว่าอัลกอริทึม KNN มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของ accuracy, precision, recall, และ F1-score เท่ากับ 91.00%, 91.60%, 91.00%, และ 91.10% ส่วนที่สองการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษา พบว่าเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษาได้อย่างแม่นยำ และช่วยให้อาจารย์สามารถนำผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นไปใช้ในการปรับปรุงการจัดการเรียนการสอนได้

จากผลการวิจัยทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ทั้งในส่วนของการจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ รวมถึงการจำแนกความคิดเห็นในแต่ละด้านของการจัดการเรียนการสอน ทั้งสองส่วนที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความคิดเห็นของนักศึกษา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการปรับปรุงการจัดการเรียนการสอนได้ ผลของการวิจัยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Munawaroh and Alamsyah (2020) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม SVM, Naive Bayes, และ KNN สำหรับวิเคราะห์ความคิดเห็นสาธารณะเกี่ยวกับความรู้สึกต่อการฉีดวัคซีน COVID-19 บน Twitter ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมข้างต้นมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ความคิดเห็นมากกว่าร้อยละ 90

แนวทางการพัฒนาในอนาคตควรพัฒนาความสามารถในการวิเคราะห์ความคิดเห็นที่มีความซับซ้อน เช่น เพิ่มการวิเคราะห์ความคิดเห็นที่เป็นเชิงบวกหรือเชิงลบอย่างมาก (Extreme sentiments) หรือความคิดเห็นที่มีลักษณะเป็นกลาง (Neutral sentiment) โดยอาจปรับปรุงเทคนิคการจำแนกประเภทให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงลึก (Deep learning) การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) หรือเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความคิดเห็นเชิงลึก

เอกสารอ้างอิง

- กานดา แผ้ววัฒนากุล และปราโมทย์ ลีอนาม. (2556). การวิเคราะห์เหมืองความคิดเห็นบนเครือข่ายสังคมออนไลน์. *วารสารการจัดการสมัยใหม่*, 11(2), 12–20.
- พิชัญญะ พรหมลา และจรัญ แสนราช. (2563). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวิเคราะห์ความพึงพอใจเกี่ยวกับการจัดการเรียนการสอนด้วยกระบวนการวิเคราะห์ความรู้สึกโดยใช้เทคนิคการรวมกลุ่มเพื่อจำแนกข้อมูล. *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 20(4), 140–149.
- วสวัตดี อินทร์แปลง และจारी ทองคำ. (2563). การวิเคราะห์ความคิดเห็นต่อเกมมือถือที่จับจี้ด้วยเหมืองข้อความ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 39(5), 524–531.
- วาทีตย์ คำพรมมา, จักรชัย โสอินทร์ และเพชร อิ่มทองคำ. (2562). แบบจำลองการวิเคราะห์ความรู้สึกแบบผสมสำหรับความคิดเห็นต่อโรงแรมในประเทศไทยโดยใช้ K-means และ K-NN. *Walailak Procedia*, 1–11.
- สุพัชรา วิริยะวิสุทธิสกุล, ปริญญา สงวนสัตย์, พิสิษฐ์ ชาญเกียรติ ก้อง และชูชาติ หล่อไชยศักดิ์. (2559). ระบบแจ้งเตือนโซเชียลมีเดียไทยสำหรับธุรกิจด้วยซอฟต์แวร์แมชชีน. *Panyapiwat Journal*, 8, 223–233.
- Chanakot, B., & Sanrach, C. (2024). A Thai-language chatbot analyzing mosquito-borne diseases using Jaccard similarity. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(1), 648–655.
- Gaye, B., & Wulamu, A. (2019). Sentiment analysis of text classification algorithms using confusion matrix. In *Cyberspace Data and Intelligence, and Cyber-Living, Syndrome, and Health: International 2019 Cyberspace Congress, CyberDI and CyberLife* (pp. 231–241). Springer Singapore.
- Munawaroh, K., & Alamsyah. (2022). Performance comparison of SVM, Naive Bayes, and KNN algorithms for analysis of public opinion sentiment against COVID-19 vaccination on Twitter. *Journal of Advances in Information Systems and Technology*, 4(2), 113–125.
- Rahat, A. M., Kahir, A., & Masum, A. K. M. (2019). Comparison of Naive Bayes and SVM Algorithm based on sentiment analysis using review dataset. In *2019 8th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends (SMART)* (pp. 266–270). IEEE.

Zhang, Y., Yun, Y., An, R., Cui, J., Dai, H., & Shang, X. (2021). Educational data mining techniques for student performance prediction: Method review and comparison analysis. *Frontiers in Psychology, 12*, 1–19.

การวิเคราะห์ปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน

An analysis of interaction design factors for online data collection applications using smartphones

สุนันทา วงศ์จตุรภัทร^{1*}

Sununthar Vongjaturapat^{1*}

Received: 1 December 2024 ; Revised: 6 February 2025 ; Accepted: 10 March 2025

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน การรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์สำหรับใช้ในงานวิจัยในสาขาต่างๆ อาจจะสามารถเข้ามาแทนที่การเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ใช้กระดาษ-ดินสอ/ปากกาได้ เนื่องจากศักยภาพของการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์ที่ปรากฏ งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการสืบหาปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน โดยอาศัยทฤษฎีความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี และหลักการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติแบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง และทดสอบสมมติฐานงานวิจัยในกลุ่มตัวอย่าง 320 คน จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง พบว่า ปัจจัยด้าน 1) เนื้อหาของคำถามในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ 2) วิธีการเลือกตัวเลือก 3) การแสดงผลลัพธ์ และ 4) การปรับมาตราส่วน เป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนได้ และสามารถรองรับการตอบแบบสอบถามออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังพบว่า วิธีการเลือกตัวเลือกของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ปรากฏบนสมาร์ทโฟน เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ ในกลุ่มตัวแปรแฝงภายใน บ่งบอกถึงความสำคัญของสัญลักษณ์ที่ต้องเข้าใจได้ง่ายและมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของหน้าจอสมาร์ทโฟน

คำสำคัญ: การยอมรับการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ, แบบจำลองความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและเทคโนโลยี, การออกแบบปฏิสัมพันธ์, ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้โดยภาพกราฟิก, แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์

Abstract

Currently, online data collection for research in various fields may replace traditional paper-and-pencil/paper-and-pen questionnaire methods due to the demonstrated potential of online data collection. This research presents an investigation into the design factors for interaction in online data collection applications using smartphones. The study is based on the Task-Technology Fit (TTF) theory and principles of interaction design. The analysis of data using Structural Equation Modeling and hypothesis testing on a sample of 320 participants from Ramkhamhaeng University found that the following factors enhance the effectiveness of designing an online data collection application using smartphones: 1) The content of the questions in the application 2) The method of selecting options 3) The presentation of results, and 4) The adjustment of the scale. These factors contribute to the application's ability to adequately support online surveys conducted via smartphones. Moreover, the research findings indicate that the method of selecting options in online data collection applications displayed on smartphones is the most significant factor compared to other factors within the endogenous latent variables. This indicated the importance of symbols that are easy to understand and of a size appropriate for the size of the smartphone screen.

Keywords: IT adoption, TTF model, interaction design, graphical user interface, online data collection application

¹ สาขาวิชาสารสนเทศศาสตร์และบรรณารักษศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร 10240

¹ Department of Information Science, Faculty of Humanities, Ramkhamhaeng University, Bangkok 10240

* Corresponding author, e-mail: Sununthar.v@ru.ac.th

บทนำ

การรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์สำหรับใช้ในงานวิจัยในสาขาต่างๆ เช่น งานวิจัยด้านการแพทย์ (Chan *et al.*, 2019; Chan *et al.*, 2021) หรือการวิจัยด้านการทำเหมืองข้อมูล (Data mining) (Lamprinakos *et al.*, 2022) อาจจะสามารถเข้ามาแทนที่การรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ใช้กระดาษ-ดินสอ/ปากกาได้ (Fischer & Kleen, 2021; Lefever *et al.*, 2006; Onoka, 2017) เนื่องจากศักยภาพของการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์ที่ปรากฏ เช่น การเข้าถึงกลุ่มตัวอย่างได้ง่ายและประหยัดมากขึ้น (Lamprinakos *et al.*, 2022) ทำให้การรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์กำลังกลายเป็นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับนำไปใช้ในงานวิจัยในสาขาต่างๆ (Fischer & Kleen, 2021; Lamprinakos *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามผลการวิจัยที่ผ่านมา ประเด็นปัญหาสำคัญของการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์คือ การขาดความตั้งใจในการตอบแบบสอบถาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มนักศึกษา/นักเรียน ทำให้ความแม่นยำในการให้ข้อมูลที่เกิดจากการตอบแบบสอบถามลดลง นอกจากนี้ปัญหาหนึ่งที่มีกพบเกี่ยวกับการใช้สมาร์ทโฟนในการดำเนินกิจกรรมออนไลน์คือ นักศึกษาจะมีผลการดำเนินกิจกรรมที่แตกต่างจากนักศึกษาที่ใช้คอมพิวเตอร์ทั่วไปหรือแม้แต่ใช้กระดาษ (Chan *et al.*, 2019; Chan *et al.*, 2021; Huff, 2015; Pathiravasan *et al.*, 2021; Imlawi *et al.*, 2023) เช่น นักศึกษามักจะยุติและออกจากแบบสำรวจออนไลน์ในระหว่างการตอบหรือก่อนเสร็จสิ้นการตอบแบบสอบถามออนไลน์ ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและประสิทธิผลของการใช้วิธีการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์ (Lefever *et al.*, 2006; Gomes *et al.*, 2022; Nayak & Narayan, 2019; Robert, 2022)

จากผลการวิจัยข้างต้นนำไปสู่คำถามการวิจัยและการนำสมาร์ทโฟนมาใช้ในการโต้ตอบกับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์หรือ “แอปแบบสอบถามที่ใช้งานบนสมาร์ทโฟน” ให้ดียิ่งขึ้นได้อย่างไร และการใช้สมาร์ทโฟนจะเหมาะสมต่อการโต้ตอบกับ “แอปแบบสอบถามที่ใช้บนสมาร์ทโฟน” หรือไม่และอย่างไร ซึ่งหากเหมาะสม คำถามถัดไปคือ อะไรคือปัจจัยสำคัญสำหรับนักศึกษาที่จะช่วยกระตุ้นและส่งเสริมให้นักศึกษาใช้สมาร์ทโฟนตอบแบบสอบถามด้วยความตั้งใจ

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการสำรวจ เพื่อนำเสนอตัวแปรการออกแบบการปฏิสัมพันธ์บนสมาร์ทโฟนที่มุ่งเน้นสำหรับ “แอปแบบสอบถามที่ใช้งานบนสมาร์ทโฟน” โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษา เพื่อสืบหาปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวแปรด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ผู้วิจัยอาศัย

ทฤษฎีความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (Task –Technology Fit model: TTF) (Goodhue & Thompson, 1995) และขยายขอบเขตทฤษฎีไปสู่บริบทของการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ในความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยีที่มีอิทธิพลต่อทัศนคติหรือความเชื่อของผู้ใช้ (เช่น ความเชื่อเกี่ยวกับผลของการใช้) ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะนำไปสู่การตัดสินใจของแต่ละบุคคลที่จะใช้หรือไม่ใช้ระบบนั้น (Wang & Wang, 2010)

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี

ทฤษฎีความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี(Task –Technology Fit model: TTF) นำเสนอโดย Goodhue and Thompson (1995) และ Goodhue (1995) สามารถใช้เพื่อคาดการณ์พยากรณ์และเพื่อการอธิบายเหตุผลได้ว่า เมื่อใดที่เทคโนโลยีมีคุณลักษณะและสามารถสนับสนุนได้ตรงตามลักษณะงานจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน ซึ่งความเหมาะสม (Fit) นั้นจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการปฏิบัติงานและในบางครั้งจะเป็นตัวกำหนดการใช้ประโยชน์จากระบบสารสนเทศ (Goodhue & Thompson, 1995; Oliveira *et al.*, 2014; Kaewkitipong, 2023) ลักษณะงาน (Task Characteristics: TA) หมายถึงการดำเนินการโดยผู้ใช้เพื่อเปลี่ยน input เป็นoutput ลักษณะของเทคโนโลยี (Technology Characteristics: TECH) หมายถึงเครื่องมือที่ผู้ใช้ใช้ในการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ และความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยีหรือ TTF คือระดับที่เทคโนโลยีสามารถช่วยเหลือผู้ใช้ในการดำเนินงานของตนได้ ความสัมพันธ์ในทฤษฎีถูกกำหนดโดยลักษณะงาน (TA) และลักษณะเทคโนโลยี (TECH) เป็นตัวกำหนดความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (TTF) ซึ่งนำไปสู่การยอมรับและการใช้เทคโนโลยีใหม่ในขั้นสุดท้าย (Goodhue, 1995; Goodhue & Thompson, 1995) อย่างไรก็ตาม โมเดลดั้งเดิมนั้นมีความซับซ้อนและมีขอบเขตใหญ่เกินไปที่จะนำมาใช้เพื่อการศึกษาขั้นพื้นฐาน (Goodhue & Thompson, 1995) ตัวอย่างเช่น การใช้แบบจำลอง TTF หรือแบบจำลองห่วงโซ่เทคโนโลยีสู่ประสิทธิภาพ (The technology-to-performance chain Model) ที่กล่าวถึงในงานวิจัยของ Goodhue and Thompson (1995) มีการใช้ทฤษฎีครอบคลุมถึงขอบเขตลักษณะงาน ลักษณะเทคโนโลยี และคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคล (Individual characteristics) แต่มีเพียงสองปัจจัย

แรกเท่านั้นที่ได้รับการอธิบายและทดสอบในการศึกษาของ Goodhue and Thompson (1995) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคลมีผลต่อความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (TTF) ที่ยังไม่ชัดเจนนัก (Goodhue & Thompson, 1995) นอกจากนี้ จากผลการวิจัยของ Goodhue (1995) มีเพียงส่วนย่อยของแบบจำลองซึ่งได้แก่ ลักษณะงาน (TA) ลักษณะเทคโนโลยี (TECH) ความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (TTF) ผลกระทบด้านประสิทธิภาพ (Performance impact) และการใช้ประโยชน์ (Utilization) เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการวิจัยเชิงประจักษ์ ซึ่งตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคลมีบทบาทสำคัญน้อยมาก สำหรับการพยากรณ์ TTF (Goodhue, 1995) ดังนั้น ปัจจัยนี้จึงถูกตัดออกจากการศึกษาในครั้งนี้

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการปรับใช้ทฤษฎี TTF มีข้อเสนอแนะว่าสามารถขยาย TTF ด้วยแนวคิดที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เพื่อให้มีคำอธิบายที่ครอบคลุมมากขึ้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเทคโนโลยี ลักษณะงาน ความเหมาะสมระหว่างงาน-เทคโนโลยี และการใช้เทคโนโลยี ดังตัวอย่างงานวิจัยในปัจจุบันของ El-Masri *et al.* (2023) ที่ปรับใช้ทฤษฎี TTF รวมกับการวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เพื่อสืบหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้สมาร์ทวอตช์ (Smartwatch) หรืองานวิจัยของ Liu *et al.* (2024) ได้ปรับใช้ทฤษฎี TTF เพื่ออธิบายการออกแบบอินเทอร์เฟซ (Interface) ของแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนที่สามารถปรับแต่งให้เหมาะสมกับผู้ใช้

2. การออกแบบการปฏิสัมพันธ์

การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ (Interaction design) หมายถึงการสร้างวิธีการสื่อสารที่จะเกิดขึ้นระหว่างผู้ใช้และระบบหรือผลิตภัณฑ์ ที่ได้ออกแบบไว้ เช่น การออกแบบการปฏิสัมพันธ์หรือการโต้ตอบที่อาจเป็นช่วงขณะหนึ่งที่เกิดขึ้น เช่น ใช้นิ้วมือกดภาพเพื่อให้ภาพเปิดขึ้นมาหรือยกนิ้วออกจากภาพเพื่อให้ภาพปิดลง หรือการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดหน้าและการนำทาง การใช้แบ่งหน้า การใช้ภาพและไอคอน (Swierenga *et al.*, 2014) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และบริการที่มีความสามารถในการเข้าถึงและใช้งานได้ง่ายสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป เช่น เว็บไซต์ แอปพลิเคชัน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกัน มนุษย์ในการปฏิสัมพันธ์กับเทคโนโลยีนั้นๆ (Barzilay, 2019; Fischer & Kleen, 2021; Onoka, 2017) จากความหมายดังกล่าว สามารถใช้เป็นกรอบแนวคิดสำหรับการออกแบบ

แบบสอบถามออนไลน์ (Designing mobile surveys) ที่ใช้งานบนสมาร์ตโฟนที่การสร้างแบบสอบถามนั้นต้องพิจารณาทั้งเนื้อหาของคำถามอย่างรอบคอบ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของสมาร์ตโฟน เช่น การใช้นิ้วมือสัมผัสบนหน้าจอ หรือการป้อนข้อมูลด้วยเสียง เป็นต้น เพื่อให้ผู้ตอบเข้าใจและตอบได้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการสำรวจ (Barzilay, 2019; Fischer & Kleen, 2021; Onoka, 2017; Swierenga *et al.*, 2014) ดังกรอบแนวคิดต่อไปนี้ 1) การจำกัดจำนวนตัวเลือกในกล่องตอบคำถาม เช่น กำหนดให้มี 4 ตัวเลือกบนหน้าจอสมาร์ตโฟน เป็นต้น 2) การแสดงข้อความบางส่วนหรือทั้งหมดในแต่ละข้อคำถาม 3) ช่องว่างบนหน้าจอที่มีพื้นที่ป้อนข้อมูลได้เพียงพอ 4) ความคมชัดระหว่างสีตัวอักษรและสีพื้นหลัง 5) ขนาดตัวอักษร 6) จุดตะสำหรับการเลือกทำเครื่องหมายบนวงรีแทนการกดภายในกล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (Check boxes) 7) จุดตะสำหรับการเลือกทำเครื่องหมายบนวงรีแทนการกดภายในวงกลมของปุ่ม «Radio button» 8) การปรับมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับในแนวตั้งหรือแนวนอน 9) การเปลี่ยนรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่าจากตัวอักษร 5 ระดับเป็นตัวเลข 5 ระดับ 10) การปรับมาตราส่วนคะแนนแบบ 10 สเกลในแนวตั้งหรือแนวนอน 11) การปรับประเภทคำถามแบบหนึ่งตารางมีหลายข้อ (Grid question) ให้เป็นการเรียงลำดับหนึ่งข้อคำถามต่อหนึ่งหน้าจอ 12) การเปลี่ยนตัวเลือกมาตราส่วนประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบของการจัดข้อความที่เรียงลำดับความสำคัญ (Card sorting) 13) การปิดหน้าจอเพื่อเปลี่ยนหน้าแบบสอบถามที่ละหน้า และ 14) การเปิดการอ่านออกเสียงของแบบสอบถาม

3. เทคโนโลยีสมาร์ตโฟน

ส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ (User interface) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของสมาร์ตโฟน สามารถจำแนกได้สามลักษณะ (Anshari *et al.*, 2017; Molina *et al.*, 2014; Shitkova *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2019) ได้แก่ ส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้ด้วยกราฟิกหรือ Graphical User Interface: GUI ส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้ทางกายภาพหรือ Physical User Interface: PUI และส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้เชิงตรรกะหรือ Logical User Interface: LUI โดยที่ GUI คือการนำเสนอภาพกราฟิกที่เป็นข้อมูลที่ผู้ใช้จำเป็นต้องใช้ในการทำงาน เช่น ไอคอนและรูปแบบตัวอักษร ส่วน PUI คือส่วนประกอบทางกายภาพที่จับต้องได้ของตัวสมาร์ตโฟน ได้แก่ ลักษณะรูปร่างสมาร์ตโฟนหรือฟอร์มแฟกเตอร์สำหรับ LUI คือส่วนที่เป็นการจัดโครงสร้าง/เลย์เอาต์ และเนื้อหาข้อมูลสำหรับใช้ดำเนินงานต่างๆ เช่น โครงสร้าง/เลย์เอาต์ของการนำทางจากหน้าจอหนึ่งไปยังหน้าจออื่นๆ ซึ่งส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ข้างต้น เป็นองค์ประกอบที่ผู้ใช้ต้อง

มีปฏิสัมพันธ์กับสมาร์ทโฟน เช่น การใช้นิ้วมือแตะ ปัด หรือแตะค้างไว้ เป็นต้น ซึ่งหากพิจารณาจากทั้งสามส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้ข้างต้น สังเกตได้ว่าสมาร์ทโฟนมีองค์ประกอบหรือลักษณะการทำงานที่อาจมีผลต่อผู้ใช้ในการตอบแบบสอบถามออนไลน์ ได้แก่ 1) ขนาดและรูปร่าง (Form factor) เนื่องจากสมาร์ทโฟนมีฟอร์มแฟกเตอร์ที่หลากหลาย เช่น หน้าจอเล็กใหญ่ ขอบโค้ง หรือพับได้ เป็นต้น ทำให้ต้องคำนึงถึงการออกแบบการแสดงผลที่สามารถลดข้อจำกัด อาทิ ในการป้อนข้อมูลหรือการอ่านข้อมูลได้ 2) การทำงานที่รองรับทั้งแนวตั้งและแนวนอน (Screen Rotation) จะมีส่วนช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกโหมดที่สะดวกต่อการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโหมดแนวนอนอาจทำให้คีย์บอร์ดใหญ่ขึ้นและพิมพ์สะดวกขึ้น 3) การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจำเป็นต่อการใช้งานแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ซึ่งคุณภาพของสัญญาณ(Signal) จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการทำงานของแอปพลิเคชันฯ 4) ระบบแก้คำผิดโดยอัตโนมัติ (Word Correction) น่าจะมีบทบาทสำคัญเมื่อผู้ใช้ต้องกรอกหรือเติมข้อมูลผ่านคีย์บอร์ดของสมาร์ทโฟน เช่น ข้อความแสดงความคิดเห็น และ 5) การคาดเดาคำของสมาร์ทโฟน (Word Suggestion) อาจช่วยลดความล่าช้าในการป้อนข้อมูล ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถส่งผลต่อความสะดวก ความแม่นยำ และประสบการณ์การใช้งานโดยรวมได้ (Fischer & Kleen, 2021; Shitkova *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2019) จึงควรพิจารณาองค์ประกอบเหล่านี้สำหรับการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ผ่านสมาร์ทโฟน เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและตรงกับพฤติกรรมของผู้ใช้มากที่สุด

4. การใช้สมาร์ทโฟนสำหรับการรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์

ผู้วิจัยได้สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิ Barzilay (2019) ได้ระบุว่า การรวบรวมข้อมูลเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการวิจัยต่างๆ โดยมีสมาร์ทโฟนเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเปลี่ยนวิธีการรวบรวมข้อมูลที่มีในปัจจุบัน ความสามารถของสมาร์ทโฟนในการรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถือเป็นภารกิจที่สำคัญในการวิจัยยุคปัจจุบันทั้งการวิจัยเชิงวิชาการและการวิจัยเชิงธุรกิจ และเป็นที่ยืนยันว่าผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและนักลงทุนต่างคาดหวังที่จะได้รับผลลัพธ์ และข้อสรุปจากการวิจัยอย่างรวดเร็ว และเชื่อว่าเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนสามารถนำเสนอวิธีการรวบรวมข้อมูลที่เป็นนวัตกรรมใหม่และมีประโยชน์เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลด้วยกระดาษดินสอ/ปากกาแบบดั้งเดิม

ผลการวิจัยของ Onoka (2017) ได้วิเคราะห์การบูรณาการสมาร์ทโฟนร่วมกับการรวบรวมข้อมูลออนไลน์ และระบุว่า ความสามารถในการใช้งานมักถูกประเมินจากคุณลักษณะสามประการได้แก่ ประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และความพึงพอใจ ซึ่งคุณลักษณะทั้งสามนี้มีความสำคัญมากในการสร้างความมั่นใจในการรวบรวมข้อมูลที่ต้องการและทันเวลาที่ให้กับระบบสาธารณสุข นอกจากนี้เพราะการใช้สมาร์ทโฟนที่เติบโตอย่างรวดเร็วยังนำไปสู่ความต้องการใช้สมาร์ทโฟนในโหมดการรวบรวมข้อมูลด้วย สำหรับความท้าทายที่เป็นอุปสรรคต่อการใช้สมาร์ทโฟนให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น เครือข่ายอินเทอร์เน็ต โครงสร้างพื้นฐาน ต้นทุนการติดตั้งและการดำเนินงาน ความสามารถของบุคลากรและความเข้าใจในการใช้เทคโนโลยีใหม่

Fischer and Kleen (2021) ได้ระบุในผลการวิจัยว่าการใช้สมาร์ทโฟนสามารถช่วยรวบรวมข้อมูลในการวิจัยทางระบาดวิทยาได้ ช่วยเพิ่มศักยภาพในการถ่ายโอนข้อมูลแบบเรียลไทม์ การซิงโครไนซ์ข้อมูลที่รวดเร็ว และความเป็นไปได้ในการติดตามอาการผู้ป่วยในระยะยาว รวมถึงสามารถลดข้อผิดพลาดหรืออคติที่เกิดขึ้นระหว่างการตอบแบบสำรวจของผู้ป่วยด้วยตนเองได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้เพิ่มเติม เพื่อทดสอบการบังคับใช้และการยอมรับ “แอปบนสมาร์ทโฟน” สำหรับการวิจัยทางระบาดวิทยาในกลุ่มประชากรต่างๆ ต่อไป

การวิจัยของ Zou *et al.* (2018) ระบุว่า การใช้สมาร์ทโฟนทำแบบสำรวจออนไลน์กำลังเป็นที่นิยมและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นต่อไป โดยมีความพยายามที่จะทำให้สมาร์ทโฟนเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการสำรวจข้อมูลแบบออนไลน์ให้กับนักวิจัยที่ต้องการสำรวจแบบออนไลน์กับกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ ซึ่งข้อค้นพบยังระบุอีกว่าผู้ตอบที่ใช้สมาร์ทโฟนมักให้คำตอบที่สั้นกว่าในคำถามแบบปลายเปิดเมื่อเทียบกับผู้ตอบที่ใช้คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ/โน้ตบุ๊กแต่คุณภาพของการตอบไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผู้ตอบที่ใช้คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ/โน้ตบุ๊กและใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่า ผู้ทำแบบสำรวจออนไลน์ที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มักเป็นกลุ่มที่มีอายุน้อยกว่า มีแนวโน้มที่จะเป็นเพศหญิงมากกว่าและมีระดับรายได้ที่สูงกว่า

สำหรับการสำรวจออนไลน์ (Online Survey) โดยใช้เครื่องมือทางออนไลน์ เช่น เว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน มักมีข้อดีในเรื่องของความสะดวกสบายสำหรับผู้เข้าร่วมตอบแบบสำรวจและการวิเคราะห์ข้อมูลที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพได้ในทันที (Bhat, 2018; Peytchev & Hill, 2010; Zou *et al.*, 2018) อย่างไรก็ตาม Antoun *et al.* (2017) พบว่า ผู้ตอบแบบ

สำรวจออนไลน์ที่ใช้สมาร์ทโฟนมักทำงานหลายอย่างพร้อมกัน ในขณะที่ตอบแบบสำรวจมากกว่าผู้ตอบแบบสำรวจที่ใช้คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ และสรุปว่าการทำงานหลายอย่างพร้อมกัน ผู้ตอบแบบสอบถามมีแนวโน้มที่จะเสียสมาธิมากขึ้น และให้ความสำคัญกับการตอบแบบสำรวจน้อยลง ส่งผลให้คำตอบมีคุณภาพและความแม่นยำอยู่ในระดับต่ำ (Antoun et al., 2017)

การพัฒนาแบบจำลองสมมติฐานงานวิจัย

1. การสร้างแบบจำลอง TTF ของการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน

เนื่องจาก สมาร์ทโฟนได้เปลี่ยนวิธีการโต้ตอบกับแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์สู่รูปแบบใหม่ เช่น การใช้นิ้วมือกดบนภาพเพื่อให้ภาพเปิดขึ้นมาและยกนิ้วออกจากภาพเพื่อให้ภาพปิดลงแทนการใช้เมาส์ หรือการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดหน้าและการนำทาง การแบ่งหน้า การใช้ปุ่มและไอคอนที่แตกต่างจากการออกแบบสำหรับเว็บไซต์ ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและใช้งานแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์ได้ง่าย และยังสามารถคงคุณภาพของการตอบแบบสำรวจได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ตอบที่ใช้คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ/โน้ตบุ๊ก (Zou et al., 2018) ซึ่งบริบทใหม่ของการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนนี้มีความแตกต่างจากการรวบรวมข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ใช้ปากกา/ดินสอและกระดาษอย่างชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแนวทางการวิจัยเชิงสำรวจ เชิงปริมาณ และอื่นๆ มาปรับใช้เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการศึกษานี้ (Creswell & Creswell, 2024) โดยผู้วิจัยได้พัฒนาตัวชี้วัดใหม่ (New measuring instruments) สำหรับปัจจัยด้านลักษณะงานลักษณะเทคโนโลยี และความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี ด้วยการสกัดข้อมูลที่รวบรวมจากผลการวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบริบทของแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์ ซึ่งข้อมูลการสำรวจที่ได้รับจากการทบทวนวรรณกรรมจะถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการจัดทำแบบสอบถามการสำรวจต่อไป

องค์ประกอบหรือปัจจัยต่างๆ (Constructs) และข้อคำถามเริ่มต้นสำหรับการสร้างแบบจำลองความเหมาะสมระหว่างลักษณะเทคโนโลยีและลักษณะงานหรือ TTF สำหรับการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ประกอบด้วยผลการวิจัยที่ผ่านมา อาทิ Zaller and Feldman (1992) ทฤษฎีจิตวิทยา

เมตริก (Psychometric Theory) (Nunnally, 1967) ทฤษฎี Cannell's Process Theory (Cannell et al., 1981) รวมถึงวรรณกรรมด้านการสำรวจออนไลน์ (Online Survey Theory) อาทิ Bhat (2018), Nayak and Narayan (2019), Peytchev and Hill (2010) และ Sandesara et al. (2022) ที่ใช้เป็นแนวทางการพัฒนาตัวชี้วัดใหม่สำหรับลักษณะงานการตอบแบบสอบถามออนไลน์ และสำหรับตัวชี้วัดใหม่ของสมาร์ทโฟนได้ปรับใช้จากผลการวิจัยของ เช่น Anshari et al. (2017) Molina et al. (2014), Shitkova et al. (2015) และ Sun et al. (2019) นอกจากนี้ ตัวชี้วัดใหม่สำหรับวิเคราะห์ด้านความเหมาะสมระหว่างการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนและกระบวนการตอบแบบสอบถามออนไลน์ ได้ปรับใช้จากผลการวิจัยของ อาทิ Barzilay (2019), Fischer and Kleen (2021), Onoka (2017) และ Swierenga et al. (2014) ในขณะที่สำหรับตัวชี้วัดด้านผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน (PIM) ได้ตัวชี้วัดเดิมจากทฤษฎี Venkatesh (2003), Goodhue and Thompson (1995) และ Goodhue (1995) โดยปรับใช้คำให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถรักษาความถูกต้องของเนื้อหาได้ (Straub et al., 2004) และสำหรับการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (Actual use: AU) ซึ่งจัดว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในงานวิจัยด้านระบบสารสนเทศ (Information system research) (Ajzen, 1991, 2002) ดังแบบจำลองงานวิจัยใน Figure 1

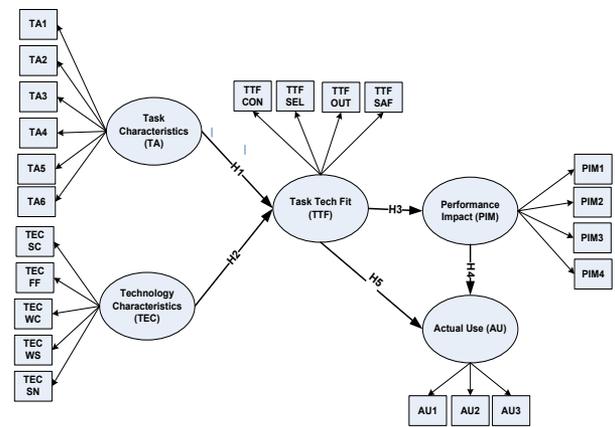


Figure 1 Research model

จาก Figure 1 แบบจำลองสมมติฐานงานวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ตัวแปรต้น ประกอบด้วย 1) ลักษณะงาน (TA) 2) ลักษณะเทคโนโลยี (TEC) สำหรับตัวแปรตาม ประกอบด้วย 1) ความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (TTF) 2) ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน (PIM) และ3) การใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU)

2. การพัฒนาแบบจำลองงานวิจัยและสมมติฐาน

ผู้วิจัยจึงได้แบ่งแนวคิดการพัฒนาแบบจำลองงานวิจัยและสมมติฐาน โดยปรับใช้ทฤษฎี TTF ด้วยการกำหนดตัวชี้วัดใหม่ เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ดังต่อไปนี้

ลำดับที่ 1 พัฒนาตัวชี้วัดใหม่สำหรับตัวแปร

ต้น: ปัจจัยด้านลักษณะงานและลักษณะของเทคโนโลยี

ลักษณะงาน หมายถึง การที่แต่ละบุคคลทำการเปลี่ยน input ให้เป็น output (Goodhue & Thompson, 1995; Goodhue, 1995) สำหรับงานวิจัยนี้ได้นิยามคำว่างงาน คือ กระบวนการตอบแบบสำรวจซึ่งเป็นงานที่ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนได้แก่ 1) การอ่านเพื่อสร้างความเข้าใจในคำถาม 2) การประมวลผลทางปัญญา 3) หลังจากการสร้างคำตอบแล้ว ผู้ตอบจะทำการประเมินความถูกต้องของคำตอบโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ 4) การประเมินผลของการตอบตามเป้าหมาย และ 5) การให้คำตอบที่ถูกต้องและตรงตามคำถาม (Cannell *et al.*, 1981) นอกจากนี้ ผู้วิจัยเชื่อว่าลักษณะของกระบวนการตอบแบบสอบถามออนไลน์มีความเกี่ยวข้องกับ การอ่านเพื่อสร้างความเข้าใจในคำถามที่ปรากฏบนหน้าจอสมาร์ทโฟน โดยที่แต่ละบุคคลจะมีรูปแบบการอ่านได้หลากหลาย เช่น อ่านคำถามแบบคร่าว ๆ หรืออ่านแบบวิเคราะห์เชิงลึก (Setiawan, 2019; Williamson, 2021) รวมถึงการกรอกหรือการเติมข้อมูล (Peytchev & Hill, 2010; Sandesara *et al.*, 2022) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่า ลักษณะของกระบวนการตอบแบบสอบถามออนไลน์ น่าจะมีอิทธิพลต่อการรับรู้ของผู้ใช้ถึงระดับความเหมาะสมระหว่างลักษณะของการตอบแบบสอบถามและลักษณะการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ของแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีลักษณะการทำงานตามที่ปรากฏในปัจจุบัน นอกจากนี้ตามที่ปรากฏในทฤษฎี TTF ลักษณะงาน และลักษณะเทคโนโลยี เป็นบุพปัจจัย (Antecedents) ของความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี (Goodhue & Thompson, 1995; Goodhue, 1995) ดังนั้นสมมติฐานงานวิจัย คือ

สมมติฐานที่ 1 TA มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ TTF

ตามทฤษฎี TTF ลักษณะของเทคโนโลยี หมายถึง เครื่องมือที่แต่ละบุคคลใช้ในการช่วยปฏิบัติงานให้สำเร็จซึ่งในบริบทของงานวิจัยทางด้านระบบสารสนเทศ เทคโนโลยีหมายถึงระบบคอมพิวเตอร์ (ฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และข้อมูล) และบริการที่ช่วยสนับสนุนผู้ใช้ในงานที่ต้องปฏิบัติ (Goodhue & Thompson, 1995) สำหรับงานวิจัยนี้ อาศัยข้อค้นพบของ Molina *et al.* (2014) Shitkova *et al.* (2015), Sun *et al.*

(2019), และ Anshari *et al.* (2017) ที่องค์ประกอบของสมาร์ตโฟนสามารถจำแนกได้สามลักษณะได้แก่ GUI คือการนำเสนอภาพกราฟิกที่เป็นข้อมูลที่ใช้จำเป็นต้องใช้ในการทำงาน อาทิ ไอคอนและรูปแบบตัวอักษร ส่วน PUI คือส่วนประกอบทางกายภาพที่จับต้องได้ของตัวสมาร์ตโฟนเอง อาทิ พอร์มแฟกเตอร์ของสมาร์ตโฟน (Form factor) และ LUI คือส่วนที่เป็นการจัดโครงสร้าง/เลย์เอาต์ (Layout) และเนื้อหาข้อมูลสำหรับใช้ดำเนินงานต่าง ๆ อาทิ โครงสร้าง/เลย์เอาต์ของการนำทางจากหน้าจอหนึ่งไปยังหน้าจออื่น ๆ ที่อาจจะมีอิทธิพลต่อความเหมาะสมระหว่างลักษณะเทคโนโลยีและลักษณะงานหรือ TTF นอกจากนี้ ปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าของสมาร์ตโฟนจึงเชื่อได้ว่าเทคโนโลยีสมาร์ตโฟนสามารถนำเสนอวิธีการรวบรวมข้อมูลที่เป็นนวัตกรรมใหม่และมีประโยชน์เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลด้วยกระดาษ-ดินสอ/ปากกาแบบดั้งเดิม (Barzilay, 2019) ซึ่งรวมถึงมีส่วนช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำงานได้หลายอย่างพร้อมกันในขณะที่ตอบแบบสอบถามออนไลน์ได้ (Zou *et al.*, 2018; Antoun *et al.*, 2017) โดยอาศัยองค์ประกอบที่เป็นส่วนเชื่อมต่อประสานงานผู้ใช้งานนี้ 1) พอร์มแฟกเตอร์ของสมาร์ตโฟนที่หลากหลายในปัจจุบัน เช่น หน้าจอเล็ก-ใหญ่ ขอบโค้ง หรือพับได้ เป็นต้น จะสามารถลดข้อจำกัดที่เกิดจากหน้าจอสมาร์ตโฟนมีขนาดเล็กได้ อาทิ ใน การป้อนข้อมูลหรือการอ่านข้อมูล 2) การรองรับการใช้งานได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน (Screen Rotation) มีส่วนช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกโหมดที่สะดวกต่อการใช้งาน (โหมดแนวนอนอาจทำให้คีย์บอร์ดใหญ่ขึ้นและพิมพ์สะดวกขึ้น) 3) ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่มีคุณภาพ (Signal) จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการใช้งานแอปพลิเคชันฯ 4) ระบบแก้คำผิดโดยอัตโนมัติ (Word Correction) ที่ช่วยเหลือเมื่อผู้ใช้กรอกหรือเติมข้อมูลผ่านคีย์บอร์ดของสมาร์ตโฟน และ 5) การคาดเดาข้อความของสมาร์ตโฟน (Word Suggestion) อาจช่วยลดความล่าช้าในการป้อนข้อมูล ทำให้ประสบการณ์การใช้งานราบรื่นขึ้น ซึ่งข้อได้เปรียบเหล่านี้อาจมีผลต่อปัจจัยด้าน TTF สอดคล้องกับงานวิจัยของ Safarudin (2023) ที่ยืนยันได้ว่าลักษณะเทคโนโลยีมีอิทธิพลโดยตรงต่อปัจจัยด้าน TTF เมื่อกลุ่มตัวอย่างได้ใช้ “Google form” ในกระบวนการสรรหาบุคลากร และงานวิจัยของ Shahzad *et al.* (2023) ที่ระบุว่าการใช้ แอปพลิเคชันส่งอาหารบนสมาร์ตโฟนส่งผลเชิงบวกต่อปัจจัยด้าน TTF (Shahzad *et al.*, 2023) ดังนั้นสมมติฐานงานวิจัย คือ

สมมติฐานที่ 2 ลักษณะการทำงานของสมาร์ตโฟน (TEC) ทั้ง 5 องค์ประกอบ มีผลกระทบเชิงบวกต่อ TTF

ลำดับที่ 2 พัฒนาตัวชี้วัดใหม่สำหรับตัวแปรตาม: ปัจจัยด้านความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานและลักษณะเทคโนโลยี

ตามทฤษฎี TTF เมื่อใดที่เทคโนโลยีมีคุณลักษณะและสามารถสนับสนุนได้ตรงตามลักษณะงานจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน ซึ่งความเหมาะสม (Fit) นั้นจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน (PIM) และในบางครั้งจะเป็นตัวกำหนดการใช้ประโยชน์จากระบบสารสนเทศ (Goodhue & Thompson, 1995; Oliveira *et al.*, 2014; El-Masri *et al.*, 2023) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Howard and Rose (2019) ที่ได้ตั้งข้อสังเกตว่า ความสำเร็จหรือความล้มเหลวและปัญหาที่เกิดขึ้นในงานหรือในการใช้เทคโนโลยีนั้น ๆ ไม่ได้มาจากคุณสมบัติของงานหรือเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่มาจากการผสมผสานระหว่างลักษณะของงานและลักษณะของเทคโนโลยีนั้นๆ เมื่อนำงานและเทคโนโลยีมาผสมผสานกันอาจทำให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป เช่น การนำเทคโนโลยีสื่อสารมาใช้ในการจัดการงานอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารระหว่างทีมงานได้ หรือการนำเทคโนโลยีที่ไม่เหมาะสมมาใช้ในงานบางประเภทอาจทำให้เกิดปัญหาเช่น การสื่อสารที่อาจมีการสูญเสียข้อมูลสำคัญ ดังนั้นการใช้งานและการทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมระหว่างงานและเทคโนโลยีจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการประสบความสำเร็จในกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Maatouk *et al.* (2020) และ Bere (2018) ที่พบว่า ความเหมาะสมระหว่างลักษณะเทคโนโลยีและลักษณะงานมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้เมื่อผู้ใช้สามารถบรรลุเป้าหมายการทำงานได้อย่างรวดเร็วและมีผลลัพธ์ที่ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยคาดว่าเมื่อใดที่ลักษณะของการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ เช่น การปรับประเภทคำถามแบบหนึ่งตารางมีหลายข้อ (Grid question) ให้เป็นการเรียงลำดับหนึ่งข้อคำถามต่อหน้าจอ หรือ การเปลี่ยนรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่าจากตัวอักษร เป็นตัวเลข เป็นต้น มีความเหมาะสมกับกระบวนการตอบแบบสอบถามออนไลน์ (TTF) นำที่จะทำให้ผู้ใช้รับรู้ได้ถึงประโยชน์และช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้ในกระบวนการตอบแบบสำรวจออนไลน์ได้ เช่น ช่วยให้การเสียสมาธิลดลงและให้ความสำคัญกับการตอบแบบสอบถามมากขึ้น เป็นต้น (Fischer & Kleen, 2021) ในทางกลับกัน หากไม่เหมาะสม ผู้ใช้อาจพิจารณาที่จะใช้เทคโนโลยีประเภทอื่นเพื่อทดแทน เช่น การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสำหรับการตอบแบบสำรวจออนไลน์ (Al-Maatouk *et al.*, 2020; Bere, 2018) ดังนั้นสมมติฐานงานวิจัย คือ

สมมติฐานที่ 3 TTF มีผลกระทบต่อ

PIM

ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน (PIM) หมายถึง ความเชื่อของแต่ละบุคคลว่าเทคโนโลยีสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานให้กับผู้ใช้ได้ (Venkatesh *et al.*, 2003) ในการปรับใช้แนวคิดของปัจจัยด้านผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานในงานวิจัยนี้ คือ ปัจจัยนี้สามารถสะท้อนด้านการรับรู้ถึงความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในกระบวนการตอบแบบสำรวจออนไลน์ได้หากผู้ใช้มีความเชื่อว่าลักษณะการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับ แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ตโฟนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตอบแบบสอบถามออนไลน์สำหรับผู้ใช้ได้ เช่น ผู้ใช้รับรู้ว่าจะช่วยในแง่การตอบแบบสอบถามออนไลน์เสร็จสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น หรือทำให้ประสบการณ์การทำงานราบรื่นขึ้น เป็นต้น สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Dang *et al.* (2020) และ Kang *et al.* (2022) ที่ระบุว่าหากผู้ใช้ได้รับบริการที่ตรงกับความต้องการและรับรู้ได้ว่าบริการนั้นมีประโยชน์ จะส่งผลให้เกิดการใช้งานเทคโนโลยี/บริการนั้นจริง (Actual use: AU) ดังนั้นสมมติฐานงานวิจัย คือ

สมมติฐานที่ 4 PIM มีผลกระทบต่อ

AU

ทฤษฎี TTF ได้ให้เหตุผลว่าการใช้เทคโนโลยีอาจมีผลทำให้ได้รับผลลัพธ์ที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของเทคโนโลยีและงานที่อาศัยเทคโนโลยีนั้นๆ ในการเปลี่ยน input ให้เป็น output (Goodhue & Thompson, 1995) ดังนั้นตามทฤษฎี หากลักษณะของเทคโนโลยีที่มีในปัจจุบันมีความเหมาะสมสามารถรองรับลักษณะงานของผู้ใช้ จะสามารถส่งผลทำให้เกิดการแสดงพฤติกรรมการใช้งานได้ เช่น การใช้สมาร์ตโฟนเพื่อรวบรวมข้อมูลแบบออนไลน์ในการวิจัยทางระบาดวิทยา (Fischer & Kleen, 2021) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ตโฟนไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตอบแบบสอบถามออนไลน์ได้ จะทำให้ผู้ใช้เลือกวิธีการตอบแบบสอบถามแบบดั้งเดิมมากกว่าวิธีการใหม่ (เช่น ผู้ใช้อาจตอบแบบสอบถามออนไลน์ผ่านส่วนเชื่อมต่อประสานผู้ใช้ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะหรือแม้กระทั่งหน้าจอแท็บเล็ตเพราะมีความสะดวกสบายมากกว่า) จึงชัดเจนว่าหากการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ตโฟนไม่ตรงตามความคาดหวังของผู้ใช้ การใช้เทคโนโลยีนั้นจะไม่ได้รับความสนใจเพราะผู้ใช้จะไม่รับรู้ถึงประโยชน์ของเทคโนโลยี (Kaewkitipong, 2023)

สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำเสนอถึงความสำคัญระหว่างความเหมาะสมระหว่างลักษณะเทคโนโลยีและลักษณะงานที่มีผลต่อการยอมรับและการใช้ของผู้ใช้งาน เช่น งานวิจัยของ Bere (2018) และ Imlawi *et al.* (2023) ที่พบว่าความเหมาะสมระหว่างงานและเทคโนโลยีมีผลกระทบต่อการใช้งานมีส่วนร่วมและความตั้งใจของนักเรียนในการใช้ระบบการจัดการเรียนรู้ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Safarudin (2023) ที่ระบุว่าความเหมาะสมระหว่างงานและเทคโนโลยีจะมีผลกระทบต่อการใช้งาน Google form ของผู้ใช้ ซึ่งผลการวิจัยข้างต้น อาจสามารถเกิดขึ้นได้จริงกับเหมาะสมระหว่างลักษณะของการออกแบบสอบถามออนไลน์และการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีในปัจจุบันที่นำไปสู่การใช้งานที่เกิดขึ้นจริงได้เช่นกัน ดังนั้นสมมติฐานงานวิจัย คือ

สมมติฐานที่ 5 TTF มีผลกระทบต่อ AU

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ ร่วมกับการวิจัยเชิงปริมาณ โดยผู้วิจัยมีวิธีดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

1.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลทฤษฎี TTF ทฤษฎีการยอมรับการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ และประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวแปรด้านเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนและตัวแปรจากทฤษฎีการออกแบบปฏิสัมพันธ์ ระหว่างผู้ใช้งาน กับวัตถุ (Physical objects) เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้างซึ่งเป็นแบบจำลองสมมติฐานการวิจัย

1.2 สร้างเครื่องมือแบบสอบถามโดยการวิเคราะห์ข้อมูลที่ศึกษาเพื่อกำหนดเป็นโครงสร้างของเครื่องมือ ขอบเขต เนื้อหา พร้อมพัฒนาแบบจำลองสมจริง (Mockup) ของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน จากนั้นนำแบบสอบถามที่สร้างตรวจสอบความตรงของเนื้อหาและหาค่าดัชนีความสอดคล้องโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน และนำผลมาพัฒนาเป็นแบบสอบถามแบบมาตราประมาณค่าระดับ

1.3 ทดสอบความเชื่อถือได้ของเครื่องมือ กับนักศึกษาระดับปริญญาตรี จำนวน 28 คน และการทดสอบซ้ำ

1.4 ขั้นตอนการวิจัยเชิงปริมาณ เครื่องมือคือแบบสอบถามแบบ มาตราประมาณค่าระดับ

1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน โดยใช้สถิติวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรม LISREL เพื่อตอบคำถามการวิจัยว่าแบบจำลอง

สมการโครงสร้างที่พัฒนามาบนพื้นฐานแนวคิดเชิงทฤษฎีและงานวิจัยสนับสนุน มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์หรือไม่

2. กลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ ศึกษาเฉพาะนักศึกษาระดับปริญญาตรี ในมหาวิทยาลัยของรัฐที่รับบุคคลเข้าศึกษาโดยไม่มีการสอบคัดเลือกและไม่จำกัดรับจำนวน ซึ่งได้แก่มหาวิทยาลัยรามคำแหง ผู้วิจัยกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างตามเงื่อนไขของโมเดลสมการโครงสร้าง (SEM) ตามหลักเกณฑ์ คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่าง 300 คน เมื่อโมเดลมีจำนวนองค์ประกอบ 7 องค์ประกอบหรือน้อยกว่า (Hair *et al.*, 2010) โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์เท่านั้น (หมายเลขใบรับรองจริยธรรมการวิจัย RU-HRE 66/0111)

3. การวิเคราะห์ผล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่รวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยระเบียบวิธีการทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ดังนี้ 1) การวิเคราะห์หาค่าสถิติพื้นฐาน 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน 3) การวิเคราะห์องค์ประกอบระดับสูงเพื่อลดความซับซ้อน ของแบบจำลองสมมติฐาน และเลือกแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายที่สุด (Parsimonious model) (Hair *et al.*, 2010) และ 4) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของคำถามกับกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยหลัก จำนวน 28 ชุด พบว่า ข้อคำถาม มีค่าความเชื่อมั่นระหว่าง 0.734-0.935 (แอลฟา) หมายถึงมีความน่าเชื่อถือสูง (Nunnally, 1978) สามารถนำแบบสอบถามไปใช้ในการศึกษาได้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยใช้เทคนิคการวัดซ้ำ ด้วยแบบสอบถามเดิมวัดกลุ่มเดิม 2 ครั้ง ในเวลาต่างกัน ผลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบสอบถามมีความสัมพันธ์กันมาก ในโมเดล TTF (5 ปัจจัย) ค่า r ที่ 0.702 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 คือแบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือสูง

2. ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล จำนวนแบบสอบถามทั้งหมดคือ 353 ฉบับ หลังจากผู้วิจัยได้ตรวจสอบประสิทธิภาพด้านการใช้สมาร์ทโฟนตอบแบบสอบถามออนไลน์หรือไม่และความครบถ้วนสมบูรณ์ของแบบสอบถาม ที่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้ทั้งหมดจำนวน 320 ฉบับ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบ

แบบสอบถาม พบว่าเพศชาย จำนวน 110 (ร้อยละ 34.5) หญิง จำนวน 210 (ร้อยละ 65.5) สังกัด คณะมนุษยศาสตร์ จำนวน 33 คน (ร้อยละ 10.31) คณะศึกษาศาสตร์จำนวน 55 คน (ร้อยละ 17.18) คณะสื่อสารมวลชนจำนวน 26 คน (ร้อยละ 8.12) คณะรัฐศาสตร์จำนวน 57 คน (ร้อยละ 17.81) คณะนิติศาสตร์ จำนวน 61 คน (ร้อยละ 19.06) คณะบริหารธุรกิจจำนวน 32 คน (ร้อยละ 10) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน 5 คน (ร้อยละ 1.56) คณะวิทยาศาสตร์ จำนวน 13 คน (ร้อยละ 4.06) คณะทัศนมาตรศาสตร์ จำนวน 12 คน (ร้อยละ 3.75) คณะเศรษฐศาสตร์ จำนวน 12 คน (ร้อยละ 3.75) คณะสาธารณสุขศาสตร์ จำนวน 14 คน (ร้อยละ 4.37) และเคยใช้สมาร์ทโฟนตอบแบบสอบถามออนไลน์จำนวน 320 คน (ร้อยละ 100)

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

3.1 ผลการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถาม

แบบสอบถามที่ใช้เป็นเครื่องมือหลักของงานวิจัย ประกอบด้วยคำถามดังนี้ (1) Task (TA) 6 ข้อ (2) Technology (TEC) 16 ข้อ (3) Task-Technology Fit (TTF) 14 ข้อ (4) Performance Impact (PIM) 4 ข้อ และ (5) Actual Use (AU) 3 ข้อ รวมจำนวนข้อคำถาม 43 ข้อ ซึ่งก่อนการวิเคราะห์องค์ประกอบ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค พบว่ามีค่ามากกว่า 0.70 ขึ้นไป จึงสามารถนำแบบสอบถามไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปได้ (Nunnally, 1978) ดังแสดงรายละเอียดใน Table 1

3.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของเมทริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

พิจารณาค่า KMO (Kaiser–Meyer–Olkin Measure of Sampling Adequacy) มีค่าเท่ากับ 0.837 – 0.592 ซึ่งมากกว่า 0.50 แสดงว่า ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ มีความเหมาะสมสำหรับนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ ส่วนการทดสอบด้วย Barlett’s test of sphericity เป็นทดสอบสมมติฐานว่า เมทริกซ์สหสัมพันธ์นี้ เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) หรือไม่ พบว่า ค่า Chi-Square = 7179.731 และมีค่านัยสำคัญทางสถิติ (Sig.) = .000 ซึ่งน้อยกว่า .05 หมายถึง เมทริกซ์ของตัวแปรสังเกตได้ ไม่เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ แสดงว่า ตัวแปรสังเกตได้ทั้ง 43 ตัวแปร มีความสัมพันธ์กัน จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบได้ ดัง Table 1

3.3 การสกัดองค์ประกอบและการหมุนแกน

ผู้วิจัยได้สกัดองค์ประกอบ โดยใช้วิธีองค์ประกอบหลัก (Principle component analysis) และหมุนแกนองค์ประกอบด้วยวิธีออร์ทोगอนอล (Orthogonal rotation) ด้วยวิธีแวนริแมกซ์ (Varimax) ดัง Table 1

Table 1 Result of KMO and factor analysis

Construct	KMO	Eigen value	Alpha
Task (TA)	0.837	8.704	0.855
Task technology fit (TTF)			
• Contents (CON)	0.802	4.335	0.837
• Selection (SEL)	0.772	2.639	0.816
• Output (OUT)	0.633	2.399	0.831
• Scaling Adjustment (SAD)	0.670	2.107	0.763
Technology (TEC)			
• Screen Rotation (SC)	0.693	1.924	0.845
• Form Factor (FF)	0.703	1.710	0.842
• Words Correction (WC)	0.719	1.594	0.831
• Words Suggestion (WS)	0.725	1.509	0.845
• Signal (SN)	0.801	1.408	0.852
Performance Impact (PIM)	0.705	1.193	0.788
Actual Use (AU)	0.592	1.070	0.791

จาก Table 1 พิจารณาตามเกณฑ์พบว่าองค์ประกอบของแบบจำลองสมมติฐานงานวิจัยประกอบด้วย 12 องค์ประกอบ ค่าไอเกน ระหว่าง 1.070–8.704 (ค่ามากกว่า 1.0) ตัวแปรที่อธิบายแต่ละองค์ประกอบมี 3 ตัวแปรขึ้นไป รวมตัวแปรสังเกตได้ 43 ตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบตั้งแต่ 0.30 ขึ้นไป ค่าเคเอ็มโอระหว่าง 0.837 -0.592 (ค่ามากกว่า 0.5) และค่าแอลฟาของครอนบาค ระหว่าง 0.855–0.763 (ค่ามากกว่า 0.70) (Hair et al., 2010; Nunnally, 1978)

4. ผลการวิเคราะห์เพื่อตอบวัตถุประสงค์ของการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้างของโมเดลการวัด

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความเที่ยงตรงของตัวชี้วัด โดยพิจารณาดัชนีความเชื่อถือได้ที่ค่า Composite reliability (CR) โดย CR จะต้องสูงกว่า 0.60 หรือมากกว่า (Brunner & Süß, 2005) และตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปรแฝง ว่าตัวแปรสังเกต

ได้ (ตัวชี้วัด) ในชุดตัวแปรแฝงหนึ่ง ๆ มีความเหมาะสมในการเป็นตัวแทนการวัดหรือไม่ โดยพิจารณาความเที่ยงตรงเชิงเหมือน ที่ต้องมีค่า loading มากกว่า 0.70 และควรมีค่า AVE สูงกว่า 0.50 ดังตารางที่ 2 และความเที่ยงตรงเชิงจำแนก ที่

ควรมีค่า \sqrt{AVE} สูงกว่าค่า cross construct correlation ระหว่าง Construct ในสแตมภ์ที่พิจารณากับปัจจัยอื่น (Hair *et al.*, 2010)

Table 2 Confirm factor analysis for the survey instrument validity: Standardized item loading, t-value, AVE, and CR

Factor/Latent variables	Items	Standardized loading	t-Value	AVE	CR
Task characteristics (TA)	TA1	0.773	15.549	0.508	0.859
	TA2	0.820	16.927		
	TA3	0.763	15.264		
	TA4	0.677	12.969		
	TA5	0.647	12.236		
	TA6	0.567	10.394		
Technology characteristics (TEC)					
● Screen Rotation (SC)	SC1	0.746	14.467	0.659	0.852
	SC2	0.735	14.224		
	SC3	0.939	19.259		
● Form Factor (FF)	FF1	0.860	17.209	0.652	0.848
	FF2	0.866	17.357		
	FF3	0.682	13.050		
● Words Correction (WC)	WC1	0.805	15.546	0.625	0.833
	WC2	0.828	16.073		
	WC3	0.736	14.021		
● Words Suggestion (WS)	WS1	0.796	15.638	0.646	0.802
	WS2	0.852	17.009		
	WS3	0.764	14.893		
● Signal (SN)	SN1	0.801	16.353	0.602	0.857
	SN2	0.907	19.491		
	SN3	0.706	13.797		
	SN4	0.673	12.952		
Task technology fit (TTF)					
● Contents (CON)	CON1	0.766	14.983	0.569	0.839
	CON2	0.684	12.921		
	CON3	0.838	16.888		
	CON4	0.715	13.689		
● Selection (SEL)	SEL1	0.681	12.646	0.526	0.817
	SEL2	0.713	13.406		
	SEL3	0.834	16.313		
	SEL4	0.675	12.506		
● Output (OUT)	OUT1	0.603	11.251	0.648	0.842
	OUT2	0.936	18.757		
	OUT3	0.836	16.341		
● Scaling Adjustment (SAD)	SAD1	0.585	10.194	0.533	0.772
	SAD2	0.831	14.138		
	SAD3	0.761	13.042		
Performance Impact (PIM)					
	PIM1	0.726	13.958	0.525	0.806
	PIM2	0.984	20.375		
	PIM3	0.575	10.707		
	PIM4	0.523	9.639		
Actual Use (AU)					
	AU1	0.890	17.350	0.658	0.839
	AU2	0.986	19.666		
	AU3	0.446	8.138		

จาก Table 2 ผลการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ CR มีค่า 0.772-0.859 (มากกว่า 0.60) แสดงว่าตัวแปรสังเกตได้ให้มาตรวัดตัวแปรแฝงที่เชื่อถือได้ และค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่สกัด (AVE) มีค่า 0.508-0.659 (มากกว่า 0.50) แสดงว่าการผันแปรในตัวแปรสังเกตได้เกิดขึ้นจากตัวแปรแฝงมากกว่าเป็นข้อผิดพลาดของมาตรวัด จึงสรุปได้ว่าโมเดลการวัดทั้ง 12 ปัจจัย มีความถูกต้องและเชื่อถือได้

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบระดับสูง

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันระดับสูง เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองสมมติฐาน และควรเลือกแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายที่สุด (Hair et al., 2010) ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำแนกการอธิบายปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ดังนี้

(1) องค์ประกอบของปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ทั้ง 4 องค์ประกอบที่ผู้ใช้จำเป็นต้องมีปฏิสัมพันธ์กับแต่ละองค์ประกอบในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ได้แก่ 1) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านเนื้อหาของคำถามในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ปรากฏบนสมาร์ทโฟน (Contents interaction) ที่ผู้ใช้ควรสามารถเรียกดูข้อมูลที่สนใจได้โดยง่าย 2) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านวิธีการเลือกตัวเลือกของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ปรากฏบนสมาร์ทโฟน (Selection interaction) ที่ผู้ใช้ควรสามารถพิจารณาสัญลักษณ์ที่เข้าใจได้ง่ายหรือขนาดที่อาจจะสามารถช่วยให้ผู้ใช้รับรู้และเข้าใจตัวเลือกได้โดยรวดเร็ว 3) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านการแสดงผลของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ปรากฏบนสมาร์ทโฟน (Output interaction) ที่ผู้ใช้เห็นต้องเป็นประโยชน์และมีความสมบูรณ์ โดยผู้ใช้ควรสามารถปรับแต่งการแสดงผลหรือการตั้งค่าต่าง ๆ ตามความต้องการได้ และ 4) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านการปรับมาตราส่วนของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ปรากฏบนสมาร์ทโฟน (Scaling adjustment interaction) ที่ผู้ใช้ควรสามารถเข้าใจและนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่าย ซึ่งปัจจุบันมีบทบาทเป็นตัวแปรสังเกตได้ ที่ถูกวัดค่าจากตัวชี้วัด (Indicator) ของแต่ละองค์ประกอบ ดังแสดงใน Figure 2

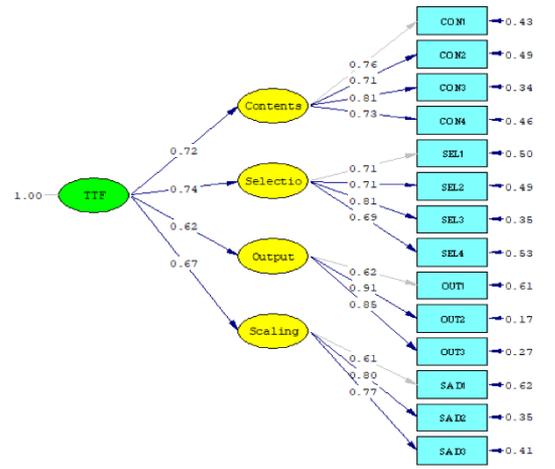


Figure 2 Second order for Interaction design

ผลการวิเคราะห์โมเดลการวัดปัจจัยด้านความเหมาะสมระหว่างการตอบแบบสอบถามออนไลน์ และการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีลักษณะการทำงานในปัจจุบันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการใช้แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันระดับสูง พบว่าโมเดลมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยมี ค่า χ^2 เท่ากับ 159.184 ($\rightarrow 0$) ค่าองศาอิสระ (df) เท่ากับ 73 ค่า χ^2/df เท่ากับ 2.18 (< 3.00) ค่าดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (GFI) เท่ากับ 0.933 (> 0.80) ค่า ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนที่ปรับค่าแล้ว (AGFI) เท่ากับ 0.904 (> 0.80) ค่า ดัชนีรากกำลังสองเฉลี่ยของความแตกต่างโดยประมาณ (RMSEA) เท่ากับ 0.0608 (< 0.80) ค่า (NFI) เท่ากับ 0.957 (> 0.94) ค่า (CFI) เท่ากับ 0.975 (> 0.90) ค่าดัชนีที่ทุกตัวผ่านเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ระหว่าง 0.62 – 0.74 โดยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านวิธีการเลือกตัวเลือกหรือ Selection ของแอปพลิเคชันฯ มีค่าน้ำหนักสูงสุด เท่ากับ 0.74 รองลงมาคือ การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านเนื้อหาหรือ Contents ของแอปพลิเคชันฯ ที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเท่ากับ 0.72, 0.67 และ 0.62 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า ทั้ง 4 องค์ประกอบ เป็นองค์ประกอบของปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน

(2) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันยังระดับสูงสำหรับ องค์ประกอบของสมาร์ทโฟนที่ใช้สำหรับการตอบแบบสอบถามในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์

องค์ประกอบของปัจจัยด้านสมาร์ทโฟนที่ใช้สำหรับการตอบแบบสอบถามในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ทั้ง 5 องค์ประกอบที่ผู้ใช้จำเป็นต้องมีปฏิสัมพันธ์กับ

แต่ละองค์ประกอบของสมาร์ทโฟน ได้แก่ 1) หน้าจอที่สามารถสลับทิศทางแบบแนวตั้งและแนวนอน หรือ Screen rotation 2) ลักษณะรูปร่างสมาร์ทโฟน หรือ Form factor 3) ระบบแก้คำผิดโดยอัตโนมัติของสมาร์ทโฟน หรือ Words correction 4) การคาดเดาคำของสมาร์ทโฟน หรือ Words suggestion และ 5) สัญญาณอินเทอร์เน็ตของสมาร์ทโฟนที่ใช้งานอยู่ หรือ Signal internet ซึ่งปัจจุบันมีบทบาทเป็นตัวแปรสังเกตได้ที่ถูกวัดค่าจากตัวชี้วัด (Indicator) ของแต่ละองค์ประกอบ ดังแสดงใน Figure 3

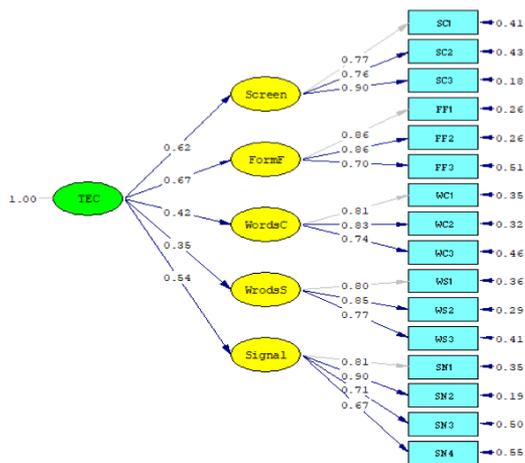


Figure 3 Second order for smartphone technology

ผลการวิเคราะห์โมเดลการวัดปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันระดับสูง พบว่าโมเดลมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยมี ค่า χ^2 เท่ากับ 154.172 ($\rightarrow 0$) ค่าองศาอิสระ (df) เท่ากับ 99 ค่า χ^2/df เท่ากับ 1.55 (< 3.00) ค่าดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (GFI) เท่ากับ 0.943 (> 0.80) ค่า ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนที่ปรับค่าแล้ว (AGFI) เท่ากับ 0.922 (> 0.80) ค่า ดัชนีรากกำลังสองเฉลี่ยของค่าความแตกต่างโดยประมาณ (RMSEA) เท่ากับ 0.041 (< 0.80) ค่า (NFI) เท่ากับ 0.956 (> 0.94) ค่า (CFI) เท่ากับ 0.984 (> 0.90) ค่าดัชนีทุกตัวผ่านเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ ระหว่าง 0.35 – 0.67 โดย ลักษณะรูปร่างสมาร์ทโฟน หรือ ฟอรั่มแฟกเตอร์ (Form factor) มีค่าน้ำหนักสูงสุด เท่ากับ 0.67 รองลงมาคือ หน้าจอที่สามารถสลับทิศทางแบบแนวตั้งและแนวนอนหรือ Screen rotation ที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเท่ากับ 0.62, รองลงมาคือ สัญญาณอินเทอร์เน็ตของสมาร์ทโฟนที่ใช้งานอยู่หรือ Signal internet มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเท่ากับ 0.54, ระบบแก้คำผิดโดยอัตโนมัติหรือ Word correction มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบเท่ากับ 0.42 และการคาดเดาคำของ สมาร์ทโฟนหรือ Word suggestion มีค่าน้ำ

หนักองค์ประกอบเท่ากับ 0.35 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า ทั้ง 5 องค์ประกอบ เป็นองค์ประกอบของสมาร์ทโฟนที่ใช้สำหรับการตอบแบบสอบถามในแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์

4.3 ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองสมการโครงสร้างกับข้อมูลเชิงประจักษ์

ผู้วิจัยได้ทดสอบความสอดคล้องของแบบจำลองการวิจัยที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ด้วยโปรแกรม LISREL โดยค่าสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง คือ ค่าไค-สแควร์ (Chi-square) ค่าองศาอิสระ (Degree of Freedom: df) ค่าไค-สแควร์สัมพัทธ์ (χ^2/df) ดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (Goodness of Fit Index: GFI) ดัชนีวัดความกลมกลืนที่ปรับแก้ไขแล้ว (Adjusted Goodness of Fit Index: AGFI) ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนเชิงเปรียบเทียบ (Comparative Fit Index: CFI) และดัชนีค่าดัชนีรากกำลังสองเฉลี่ยของค่าความแตกต่างโดยประมาณ (Root Mean Square Error of Approximation: RMSEA) ซึ่งดัชนีที่ใช้บอกความสอดคล้องกลมกลืนของโมเดลนั้นสามารถใช้ได้ในหลายตัว แต่ไม่มีตัวใดตัวหนึ่งที่ดีกว่าดัชนีตัวอื่น ๆ เพราะค่าดัชนีต่าง ๆ แต่ละตัวใช้ในแต่ละกรณี เช่น ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง วิธีการประมาณค่า ความซับซ้อนของโมเดล จำนวนตัวแปรอิสระหรือหลาย ๆ กรณีรวมกัน เป็นต้น

การพิจารณาวัดความสอดคล้องกลมกลืนของโมเดลจึงพิจารณาได้จาก ค่าไค-สแควร์ ต้องไม่มีค่านัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าไค-สแควร์สัมพัทธ์ควรมีค่าน้อยกว่า 3.00 หรือบางตำราอาจกล่าวได้ว่าควรมีค่าน้อยกว่า 5.00 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองของการประมาณค่าเพื่อใช้ทดสอบสมมติฐาน ค่า RMSEA ที่ดีมากนั้นควรมีค่าน้อยกว่า 0.05 ค่าระหว่าง 0.05-0.08 แสดงว่าโมเดลค่อนข้างสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ค่าระหว่าง 0.08-0.10 แสดงว่าโมเดลสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์เล็กน้อยและค่าที่มากกว่า 0.10 แสดงว่าโมเดลไม่สอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ (Gefen et al., 2000)

จากผลการวิเคราะห์โมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่ปรับแก้ ปรากฏว่า ผลการตรวจสอบค่า ค่าไค-สแควร์มีค่าเท่ากับ 515.08 โดยมีค่าองศาอิสระ (df) เท่ากับ 182, ค่าไค-สแควร์สัมพัทธ์ (χ^2/df) เท่ากับ 2.83, ดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (GFI) เท่ากับ 0.872, ดัชนีวัดความกลมกลืนที่ปรับแก้ไขแล้ว (AGFI) เท่ากับ 0.822, ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนเชิงเปรียบเทียบ (CFI) เท่ากับ 0.931, และดัชนีค่าดัชนีรากกำลังสองเฉลี่ยของค่าความแตกต่างโดยประมาณ (RMSEA) เท่ากับ 0.075, ค่า NNFI เท่ากับ 0.913 และค่า NFI เท่ากับ 0.896 ดังแสดง Figure 4 และใน Table 3

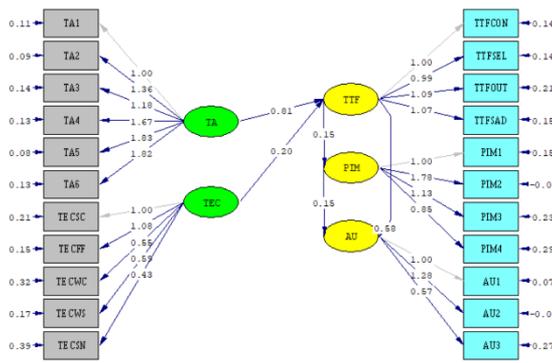


Figure 4 Structure model results

Table 3 the recommended and actual value of fit indices

Fit index	Recommended value	Actual value
χ^2 / df	< 3.00	2.83
GFI	>0.80	0.872
AGFI	>0.80	0.822
CFI	>0.90	0.931
NFI	>0.90	0.896
NNFI	>0.90	0.913
RMSEA	< 0.08	0.075

จาก Table 3 ผู้วิจัยได้พิจารณาความสอดคล้องของแบบจำลองด้วยค่าดัชนีอื่นๆ พบว่า ค่าดัชนีทุกตัวผ่านเกณฑ์

4.4 ผลการวิเคราะห์เส้นทาง

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพล ปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน เพื่อนำเสนอค่าของอิทธิพลทางตรง (Direct effect) อิทธิพลทางอ้อม (Indirect effect) อิทธิพลรวม (Total effect) ในการตอบคำถามและสมมติฐานการวิจัย ดังแสดงรายละเอียดใน Table 4

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์พยากรณ์ของตัวแปรแฝง ดังแสดงใน Table 4 ค่าสัมประสิทธิ์พยากรณ์ของตัวแปรแฝง การใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU) ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้แอป-พลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน (PIM) และความเหมาะสมระหว่างลักษณะงานลักษณะเทคโนโลยี (TTF) มีค่าเท่ากับ 0.283, 0.018 และ 0.395 ตามลำดับ แสดงว่าตัวแปรโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU) ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน (PIM) และความเหมาะสมระหว่างลักษณะงาน-ลักษณะเทคโนโลยี (TTF) ได้ร้อยละ 28 ร้อยละ 1.8 และร้อยละ 39 ตามลำดับ

Table 4 Direct, indirect and total effect in predicting Actual use

Dependent variable	AU (R ² =0.196)			
Independent variable	Direct	Indirect	Total	R ²
TTF	0.580**	0.603**	1.183**	0.394
PIM	0.153	-	0.153	0.017
TA		0.489*	0.489**	
TEC		0.121**	0.121**	

4.5 ผลการวิเคราะห์เพื่อตอบสนองสมมติฐานการวิจัย

ผลการทดสอบสมมติฐานงานวิจัย ปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ทั้งสิ้น 5 ข้อ ดังสรุปใน Table 5

Table 5 Structural model results

Hypotheses	β	t-Statistics	Result of Hypotheses testing
H1:TA->TTF	0.807**	6.324	Supported
H2:TEC->TTF	0.200**	2.632	Supported
H3:TTF->PE	0.152*	1.978	Supported
H4:PIM-> AU	0.153	1.597	Not Supported
H5:TTF->AU	0.580**	5.846	Supported

หมายเหตุ *, ** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ.05 และ .01 ตามลำดับ

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสืบหาปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ โดยอาศัย 1. ทฤษฎี TTF 2. การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตอบแบบสำรวจ การออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน และ 4. องค์ประกอบของเทคโนโลยีเคลื่อนที่ และทำการตรวจสอบความสอดคล้องของ

โมเดลที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์

ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วยตัวแปรต้นจำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ 1. ลักษณะการตอบแบบสอบถามออนไลน์ (TA) และ 2. ลักษณะการทำงานของสมาร์ทโฟนที่มีในปัจจุบัน (TEC) สำหรับตัวแปรตามจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ 1. ความเหมาะสมระหว่างการตอบแบบสอบถามออนไลน์ และการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีลักษณะการทำงานในปัจจุบัน (TTF) 2. ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ที่ใช้บนสมาร์ทโฟน (PIM) และ 3. การใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU)

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าร้อยละ (Percentage) สำหรับข้อมูลทั่วไปต่อผู้ตอบแบบสอบถาม และ 2) วิเคราะห์ความตรงเชิงโครงสร้างของโมเดลการวัด ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน การวิเคราะห์ความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูลเชิงประจักษ์ (Goodness of fit) และการวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพล (Path analysis) ด้วยโปรแกรม LISRES

5.2 อภิปรายผล

จากผลการวิจัย ได้นำเสนอปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ดังนี้

1. ตัวแปรแฝงภายนอก (Exogenous latent variables) ที่เป็นปัจจัยด้านเทคโนโลยีเคลื่อนที่ประเภทสมาร์ทโฟน ที่ผู้ใช้พิจารณาว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการตอบแบบสอบถามด้วยแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์ ประกอบด้วยปัจจัยด้านลักษณะรูปร่างสมาร์ทโฟน (ฟอร์มแฟกเตอร์) ที่ผู้ใช้ให้ความสำคัญมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านอื่นๆ (ปัจจัยด้านหน้าจอที่สามารถสลับทิศทางแบบแนวตั้งและแนวนอน ปัจจัยด้านระบบแก้คำผิดโดยอัตโนมัติของสมาร์ทโฟน ปัจจัยด้านการคาดเดาข้อความของสมาร์ทโฟน, และปัจจัยด้านสัญญาณอินเทอร์เน็ตของสมาร์ทโฟนที่ใช้ขณะอยู่) ซึ่งอาจเพราะเนื่องจากน้ำหนัก ขนาดหน้าจอ และรูปร่างสมาร์ทโฟน เพิ่มความยืดหยุ่นคล่องตัวในการตอบแบบสอบถามออนไลน์ (Antoun *et al.*, 2017)

2. ตัวแปรแฝงภายใน (Endogenous latent variables) ที่เป็นปัจจัยด้านความเหมาะสมระหว่างการตอบแบบสอบถามออนไลน์ และการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีลักษณะการทำงานในปัจจุบัน (TTF) ที่ผู้ใช้พิจารณาว่าเป็น

ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ (PIM และ AU) ประกอบด้วย การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านวิธีการเลือกตัวเลือกของแอปพลิเคชัน (Selection interaction) อาจเนื่องจากผู้ใช้สามารถรับรู้และเข้าใจตัวเลือกได้อย่างรวดเร็วผ่านสัญลักษณ์ที่เข้าใจได้ง่ายและมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของหน้าจอสมาร์ทโฟน เช่น วิธีการเลือกทำเครื่องหมายบนวงรีแทนการกดภายในกล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (Check boxes) หรือการปรับประเภทคำถามแบบหนึ่งตารางมีหลายข้อ (Grid question) ให้เป็นการเรียงลำดับหนึ่งข้อคำถามต่อหนึ่งหน้าจอ เป็นต้น (Dale & Walsoe, 2020) รองลงมาคือ การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านเนื้อหาของคำถามในแอปพลิเคชัน (Contents interaction) อาจเนื่องจากผู้ใช้ให้ความสำคัญกับข้อมูลด้านเนื้อหาของคำถามที่เข้าใจได้ง่าย เช่น สามารถปรับเนื้อหาคำถามให้พอดีกับความกว้างของหน้าจอสมาร์ทโฟนเพื่อหลีกเลี่ยงการเลื่อนหน้าจอ หรือการจำกัดจำนวนตัวเลือกในกล่องตอบดาวบนหน้าจอสมาร์ทโฟน เป็นต้น (Antoun *et al.*, 2018) ตัวอย่างงานวิจัยของ Décieux and Sischka (2024) ที่ออกแบบแบบสอบถามออนไลน์โดยใช้เทคโนโลยีที่รองรับการใช้งานบนทุกขนาดหน้าจอ (Responsive Web Design Technology หรือ RWD) ทำให้แบบสอบถามมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของหน้าจอสมาร์ทโฟนและส่งผลต่ออัตราการตอบคำถามที่สมบูรณ์และได้คำตอบที่มีคุณภาพมากขึ้น สำหรับปัจจัยการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านการปรับมาตราส่วนของแอปพลิเคชัน (Scaling adjustment interaction) อาจเนื่องจากผู้ใช้สามารถเข้าใจและนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่าย เช่น การปรับมาตราส่วนประมาณค่าในแนวตั้งหรือแนวนอน หรือการเปลี่ยนรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่าจากตัวอักษรเป็นตัวเลข เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อเวลาที่ผู้ใช้ตอบแบบสอบถามได้ (Antoun *et al.*, 2018; Décieux, 2021) ลำดับสุดท้ายคือการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านการแสดงผลลัพธ์ของแอปพลิเคชัน (Output interaction) อาจเนื่องจากผู้ใช้สนใจที่ความสามารถในการปรับแต่งการแสดงผลหรือการตั้งค่าต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ เช่น ความคมชัดระหว่างสีตัวอักษรและสีของพื้นหลัง หรือการเลือกปรับขนาดตัวอักษรได้ เป็นต้น (Gummer, 2020) ดังนั้นทั้ง 4 องค์ประกอบสามารถนำไปสู่การใช้งานแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนที่เกิดขึ้นจริง (AU) ได้ และอาจเพราะทั้ง 4 องค์ประกอบดังกล่าว (Barzilay, 2019; Fischer & Kleen, 2021; Onoka, 2017; Swierenga *et al.*, 2014) สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานของสมาร์ทโฟนจึงสามารถรองรับการตอบแบบสอบถามออนไลน์ได้อย่างเพียงพอและจึงนำไปสู่ความเหมาะสม (fit) ได้

(Goodhue 1995)

3. งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับใช้ทฤษฎี TTF โดยนำเสนอตัวชี้วัดใหม่ (New measuring instruments) เพื่อเป็นการขยายความเข้าใจเกี่ยวกับบริบทใหม่ของการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันการรวบรวมข้อมูลออนไลน์ โดยใช้สมาร์ทโฟนที่มีความแตกต่างจากการรวบรวมข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ใช้ปากกา/ดินสอและกระดาษอย่างชัดเจน

4. ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตอบแบบสอบถามออนไลน์ (PIM) ไม่มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกต่อการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ด้วยค่าอิทธิพลทางตรงเท่ากับ 0.153 และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์หรือค่า R2 ที่ 0.017 อาจเนื่องจากการที่ปัจจัยด้านความเหมาะสมระหว่างการตอบแบบสอบถามออนไลน์ และการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชัน ที่มีลักษณะการทำงานในปัจจุบัน (TTF) มีอิทธิพลต่อการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง (AU) เหนือกว่า ดังที่ไดกล่าวไว้ในสมมติฐานที่ 5 และดังนั้นจึงทำให้ลดบทบาทของปัจจัยด้านผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตอบแบบสอบถามออนไลน์ (PIM) ได้

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดงานวิจัย

ข้อเสนอแนะ: จากผลการวิจัยจึงนำไปสู่ข้อเสนอนี้ได้ว่าปัจจัยด้านการออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟนอาจจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของการออกแบบปฏิสัมพันธ์ทั้ง 4 องค์ประกอบที่ผู้ใช้จำเป็นต้องมีปฏิสัมพันธ์กับแต่ละองค์ประกอบในแอปพลิเคชัน ได้แก่

1. การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านเนื้อหาของคำถาม (Content interaction) ผู้ออกแบบแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ควรพิจารณาที่การให้ข้อมูลเกี่ยวกับเนื้อหาของคำถามที่ผู้ใช้ควรสามารถเข้าใจได้ง่าย ซึ่งควรต้องมีการจัดเรียงเนื้อหาให้เป็นระเบียบและเข้าใจง่าย เช่น การใช้การจำกัดจำนวนตัวเลือกในกล่องดรอปดาวน์ (Drop down) ได้ เช่น กำหนดให้มี 4 ตัวเลือกบนหน้าจอ เพื่อให้เนื้อหาคำถามเหมาะสมกับขนาดหน้าจอสมาร์ทโฟน ดังตัวอย่างใน Figure 5 หรือการแสดงข้อความบางส่วนหรือทั้งหมดในแต่ละข้อความได้ ดังตัวอย่างใน Figure 6 หรือการแตะที่บริเวณช่องว่างบนหน้าจอเพื่อขยายพื้นที่ป้อนข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น หรือการแตะหรือปิดหน้าจอเพื่อเปลี่ยนหน้าแบบสอบถามที่สะดวกเพื่อให้การเรียกดูหรือเข้าถึงข้อมูลคำถามที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ



Figure 5 Drop-down boxes and pickers with limited options available



Figure 6 Short question texts

2. การออกแบบการปฏิสัมพันธ์ด้านวิธีการเลือกตัวเลือก (Selection interaction) ผู้ออกแบบแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ทโฟน ควรพิจารณารูปแบบของตัวเลือกที่ต้องมีอินเทอร์เฟซ (Interface) ที่ใช้งานง่ายและชัดเจน เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำการเลือกตัวเลือกได้ตรงกับความต้องการ โดยอาจเป็นการใช้สัญลักษณ์ที่เข้าใจได้ง่ายหรือขนาดที่อาจจะสามารถช่วยให้ผู้ใช้รับรู้และเข้าใจตัวเลือกได้โดยรวดเร็ว เช่น การใช้วิธีการแตะที่ตัวอักษรในวงรีเพื่อเลือก (Check boxes button) แทนการกดภายในกล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (Check boxes) ดังตัวอย่างใน Figure 7 หรือใช้วิธีการแตะที่ตัวอักษรในวงรีเพื่อเลือก (Button select) แทนการกดภายในวงกลมของปุ่ม (Radio button) ที่เป็นสัญลักษณ์ที่เข้าใจได้ง่ายและมีขนาดภาพเหมาะสมต่อการใช้งานบนหน้าจอสมาร์ทโฟน

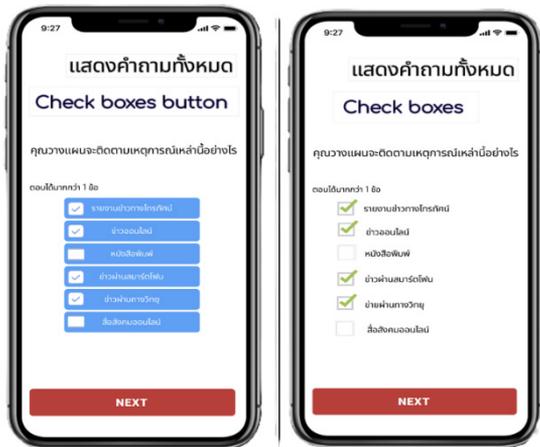


Figure 7 Select the 'Check boxes button' instead of 'Check boxes'

ข้อจำกัดงานวิจัย: เนื่องจากความหลากหลายของผู้ใช้ที่ยังคงจำกัดเฉพาะในกลุ่มนักศึกษา จึงอาจส่งผลกระทบต่อรูปแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับแอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ตโฟนสำหรับผู้ใช้อย่างหลากหลาย ซึ่งอาจต้องการการสำรวจและการทดสอบที่แตกต่างกันเพื่อให้แน่ใจว่าแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับกลุ่มผู้ใช้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลบางส่วนหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการวิจัยในกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายยิ่งขึ้น อาจจะสามารถให้ความเข้าใจได้อย่างดียิ่งขึ้นต่อการยอมรับการใช้แอปพลิเคชันรวบรวมข้อมูลออนไลน์โดยใช้สมาร์ตโฟน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ประเภทมหาวิทยาลัย โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา งบประมาณ พ.ศ. 2566 เลขที่สัญญา 114/2566 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะมนุษยศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนด้านเวลาและโอกาสในการพัฒนาทักษะด้านการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Ajzen, I. (2002). Perceived behavioral control, self-efficacy, locus of control, and the theory of planned behavior. *Journal of Applied Social Psychology*, 32(4), 665–683. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2002.tb00236.x>
- Al-Maatouk, Q., Othman, M., Aldraiweesh, A., Alturki, U., Al-Rahmi, W., & Aljeraiwi, A. (2020). Task-technology fit and technology acceptance model application to structure and evaluate the adoption of social media in academia. *IEEE Access*, 8, 78207–78216. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990420>
- Anshari, M., Almunawar, M. N., Shahrill, M., Wicaksono, D., & Huda, M. (2017). Smartphones usage in the classrooms: Learning aid or interference? *Education and Information Technologies*, 22(6), 3063–3079. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9572-7>
- Antoun, C., Couper, M., & Conrad, F. (2017). Effects of mobile versus PC web on survey response quality: A crossover experiment in a probability web panel. *Public Opinion Quarterly*, 81(S1), 280–306. <https://doi.org/10.1093/poq/nfw088>
- Antoun, C., Katz, J., Argueta, J., & Wang, L. (2018). Design heuristics for effective smartphone questionnaires. *Social Science Computer Review*, 36(5), 557–574. <https://doi.org/10.1177/0894439317727072>
- Barzilay, M. (2019). *Data collection and mobile technologies*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31541.93929>
- Bere, A. (2018). Applying an extended task-technology fit for establishing determinants of mobile learning: An instant messaging initiative. *Journal of Information Systems Education*, 29(4), 239–252.
- Bhat, A. (2018, August 17). *Online survey: What it is, advantages & examples*. QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/what-are-online-surveys/>
- Brunner, M., & Süß, H.-M. (2005). Analyzing the reliability of multidimensional measures: An example from intelligence research. *Educational and Psychological Measurement*, 65(2), 227–240. <https://doi.org/10.1177/0013164404268669>
- Cannell, C. F., Miller, P. V., & Oksenberg, L. (1981). Research on interviewing techniques. *Sociological Methodology*, 12, 389–437. <https://doi.org/10.2307/270748>
- Chan, E. C., Sun, Y., Aitchison, K. J., & Sivapalan, S. (2019). *Mobile app-based self-report questionnaires for assessment and monitoring of bipolar disorder*:

- Systematic review* (Preprint). JMIR Formative Research. <https://doi.org/10.2196/13770>
- Chan, E. C., Sun, Y., Aitchison, K. J., & Sivapalan, S. (2021). Mobile app-based self-report questionnaires for the assessment and monitoring of bipolar disorder: Systematic review. *JMIR Formative Research*, 5(1), e13770. <https://doi.org/10.2196/13770>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2024). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.
- Dale, T., & Walsoe, H. (2020). Optimizing grid questions for smartphones: A comparison of optimized and nonoptimized designs and effects on data quality on different devices. In P. Beatty, D. Collins, L. Kaye, J. L. Padilla, G. Willis, & A. Wilmot (Eds.), *Advances in questionnaire design, development, evaluation and testing* (pp. 375–402). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119263685.ch15>
- Dang, Y. (Mandy), Zhang, Y. (Gavin), Brown, S. A., & Chen, H. (2020). Examining the impacts of mental workload and task-technology fit on user acceptance of the social media search system. *Information Systems Frontiers*, 22(3), 697–718. <https://doi.org/10.1007/s10796-018-9879-y>
- Décieux, J. P. (2021). Is there more than the answer to the question? Device use and completion time as indicators for selectivity bias and response convenience in online surveys. In M. Erlinghagen, A. Ette, N. Schneider, & N. Witte (Eds.), *The global lives of German migrants* (pp. 309–324). Springer.
- Décieux, J. P., & Sischka, P. E. (2024). Comparing data quality and response behavior between smartphone, tablet, and computer devices in responsive design online surveys. *Sage Open*, 14(2). <https://doi.org/10.1177/21582440241252116>
- El-Masri, M., Al-Yafi, K., & Kamal, M. M. (2023). A task-technology-identity fit model of smartwatch utilisation and user satisfaction: A hybrid SEM-neural network approach. *Information Systems Frontiers*, 25(2), 835–852. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10256-7>
- Fischer, F., & Kleen, S. (2021). Possibilities, problems, and perspectives of data collection by mobile apps in longitudinal epidemiological studies: Scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, 23(1), e17691. <https://doi.org/10.2196/17691>
- Gefen, D., Straub, D., & Boudreau, M. (2000). Structural equation modeling and regression: Guidelines for research practice. *Communications of the Association for Information Systems*, 4(1), Article 7. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.00407>
- Gomes, H., Farrington, D., Krohn, M., Cunha, A., Jurdi, J., Sousa, B., Morgado, D., Hoft, J., Hartsell, E., Kassem, L., & Maia, A. (2022). The impact of modes of administration on self-reports of offending: Evidence from a methodological experiment with university students. *Journal of Experimental Criminology*, 20(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11292-022-09531-z>
- Goodhue, D. L. (1995). Understanding user evaluations of information systems. *Management Science*, 41(12), 1827–1844. <https://doi.org/10.1287/mnsc.41.12.1827>
- Goodhue, D. L., & Thompson, R. L. (1995). Task-technology fit and individual performance. *MIS Quarterly*, 19(2), 213–236. <https://doi.org/10.2307/249689>
- Gummer, T. (2020). Adaptive and responsive survey designs. In P. Atkinson, S. Delamont, A. Cernat, J. W. Sakshaug, & R. A. Williams (Eds.), *SAGE research methods foundations*. SAGE Publications.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson.
- Howard, M., & Rose, J. (2018). Refining and extending task–technology fit theory: Creation of two task–technology fit scales and empirical clarification of the construct. *Information & Management*, 56(6), 103134. <https://doi.org/10.1016/j.im.2018.12.002>
- Huff, K. C. (2015). The comparison of mobile devices to computers for web-based assessments. *Computers in Human Behavior*, 49, 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.02.029>
- Imlawi, J. I., AL-Shatnawi, A., AlFawwaz, B. M., AL-Shatnawi, H. M., & Al-masaeed, S. (2023). A model predicting student engagement and intention with mobile learning management systems. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*,

- 18, 149–172. <https://doi.org/10.28945/5095>
- Kaewkitipong, L. (2023). *The roles of personal innovation and task technology fit in mobile payment retention* (SSRN Scholarly Paper 4416714). <https://papers.ssrn.com/abstract=4416714>
- Kang, H.-J., Han, J., & Kwon, G. H. (2022). The acceptance behavior of smart home health care services in South Korea: An integrated model of UTAUT and TTF. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13279. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013279>
- Lamprinakos, G., Magrizos, S., Kostopoulos, I., Drossos, D., & Santos, D. (2022). Overt and covert customer data collection in online personalized advertising: The role of user emotions. *Journal of Business Research*, 141, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.028>
- Lefever, S., Dal, M., & Matthíasdóttir, Á. (2006). Online data collection in academic research: Advantages and limitations. *British Journal of Educational Technology*, 38(4), 574–582. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2006.00638.x>
- Liu, Y., Tan, H., Cao, G., & Xu, Y. (2024). Enhancing user engagement through adaptive UI/UX design: A study on personalized mobile app interfaces. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(8), 1942–1962. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i8.1457>
- Molina, A. I., Redondo, M. A., Lacave, C., & Ortega, M. (2014). Assessing the effectiveness of new devices for accessing learning materials: An empirical analysis based on eye tracking and learner subjective perception. *Computers in Human Behavior*, 31, 475–490. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.04.022>
- Nayak, M. S. D. P., & Narayan, K. A. (2019). Strengths and weakness of online surveys. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 8(2), 352–357. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_319_18
- Nunnally, J. C. (1967). *Psychometric theory*. McGraw-Hill.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Oliveira, T., Faria, M., Thomas, M., & Popovič, A. (2014). Extending the understanding of mobile banking adoption: When UTAUT meets TTF and ITM. *International Journal of Information Management*, 34(5), 689–703. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.06.004>
- Onoka, K. (2017). Solutions to challenges in using mobile technology for data collection in research settings. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 5(11).
- Pathiravasan, C., Zhang, Y., Trinquart, L., Benjamin, E., Borrelli, B., Mcmanus, D., Kheterpal, V., Lin, H., Sardana, M., Hammond, M., Spartano, N., Dunn, A., Schramm, E., Nowak, C., Manders, E., Liu, H., Kornej, J., Liu, C., & Murabito, J. (2021). Adherence of mobile app-based surveys and comparison with traditional surveys: eCohort study. *Journal of Medical Internet Research*, 23(1), e24773. <https://doi.org/10.2196/24773>
- Peytchev, A., & Hill, C. (2010). Experiments in mobile web survey design. *Social Science Computer Review*, 28(3), 319–335. <https://doi.org/10.1177/0894439309353037>
- Robert, J. (2022, October 3). *2022 students and technology report: Rebalancing the student experience*. EDUCAUSE Library. <https://library.educause.edu/resources/2022/10/2022-students-and-technology-report-rebalancing-the-student-experience>
- Safarudin, M. (2023). Task technology fit adoption in the recruitment process using Google Form for IPISM members. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Pendidikan*, 16(2), 156–173.
- Sandesara, M., Bodkhe, U., Tanwar, S., Alshehri, M. D., Sharma, R., Neagu, B.-C., Grigoras, G., & Raboaca, M. S. (2022). Design and experience of mobile applications: A pilot survey. *Mathematics*, 10(14), 2380. <https://doi.org/10.3390/math10142380>
- Setiawan, A. H. (2019). *The use of skimming and scanning techniques in reading comprehension for TOEFL* [Undergraduate thesis, Ar-Raniry State Islamic University].
- Shitkova, M., Holler, J., Heide, T., Clever, N., & Becker, J. (2015). Towards usability guidelines for mobile websites and applications. In *Wirtschaftsinformatik*

- Proceedings 2015* (pp. 1603–1617). <https://aisel.aisnet.org/wi2015/107>
- Straub, D., Boudreau, M., & Gefen, D. (2004). Validation guidelines for IS positivist research. *Communications of the Association for Information Systems*, 13, Article 24. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01324>
- Sun, S., Xiong, C., & Chang, V. (2019). Acceptance of information and communication technologies in education: An investigation into university students' intentions to use mobile educational apps. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 15(1), 24–44. <https://doi.org/10.4018/IJEIS.2019010102>
- Swierenga, S. J., Propst, D. B., Ismirle, J., Figlan, C., & Coursaris, C. K. (2014). Mobile design usability guidelines for outdoor recreation and tourism. In F. F.-H. Nah (Ed.), *HCI in business* (LNCS 8527, pp. 627–638). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07293-7_61
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Wang, H.-Y., & Wang, S.-H. (2010). User acceptance of mobile internet based on the unified theory of acceptance and use of technology: Investigating the determinants and gender differences. *Social Behavior and Personality: An International Journal*, 38(3), 415–426. <https://doi.org/10.2224/sbp.2010.38.3.415>
- Williamson, P. (2021). *Skimming and scanning*. Academic Writing Skills. <https://uq.pressbooks.pub/academicwriting/skills/chapter/skimming-and-scanning/>
- Zaller, J., & Feldman, S. (1992). A simple theory of the survey response: Answering questions versus revealing preferences. *American Journal of Political Science*, 36(3), 579–616. <https://doi.org/10.2307/2111583>
- Zou, S. S., Tan, K. P., & Li, X. (2018, June). *Mobile versus PC: Does device type affect online survey response quality for tourism research?* [Paper presentation]. Travel and Tourism Research Association: Advancing Tourism Research Globally, Miami, FL. <https://www.researchgate.net/publication/327681107>

การสร้างกฎความสัมพันธ์ของปัจจัยการเกิดภาวะซึมเศร้าหลังคลอด

Association rules of factors influencing postpartum depression

อาทิตยาพร โรจรัตน์¹, วรารัตน์ สงฆ์แป้น², ภัทรลดา นามเสาร์³, ธนพล ศรีบาล³, นัทธนิชา วัฒนางาม³, รังสรรค์ บุตรแก้ว³ และ วรวิทย์ สังฆทิพย์^{4,*}

Artitayaporn Rojarath¹, Wararat Songpan², Phatlada Namsao³, Thanapon Sonban³, Natthanicha Watthanangam³, Rangsarn Butkaew³ and Worawith Sangkatip^{4,*}

Received: 19 January 2025 ; Revised: 7 July 2025 ; Accepted: 7 August 2025

บทคัดย่อ

ภาวะซึมเศร้าหลังคลอดเป็นภาวะที่เกิดจากระดับฮอร์โมนที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงหลังคลอด โดยภาวะอาการนี้จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพจิตของคุณแม่และส่งผลกระทบต่อลูกน้อยรวมถึงครอบครัว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกฎความสัมพันธ์และวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการสร้างแบบคัดกรองภาวะซึมเศร้าหลังคลอด การหาความสัมพันธ์ได้ใช้เทคนิค Apriori ในการค้นหาความสัมพันธ์จากชุดข้อมูลที่รวบรวมจากเว็บไซต์ Kaggle ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 1,503 แถว และปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 10 ปัจจัย ได้แก่ อายุ ความรู้สึกเศร้าหรืออยากร้องไห้ รู้สึกเหนื่อยง่าย ปัญหาในการนอนตอนกลางคืน การมีสมาธิหรือการตัดสินใจ ความผิดปกติของการรับประทานอาหาร ความรู้สึกผิด ไม่อยากพูดคุยกับใคร การพยายามฆ่าตัวตาย และปัจจัยเป้าหมาย คือ ความวิตกกังวล โดยในการทดลองใช้ข้อมูลในการทดสอบที่มาจากแหล่งข้อมูลเดียวอาจมีข้อจำกัดในการนำไปใช้กับประชากรที่กว้างขึ้น ในส่วนของมีการวัดประสิทธิภาพของกฎความสัมพันธ์โดยกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่ 0.2 และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำที่ 0.2 จากผลการทดลองพบว่ามีกฎความสัมพันธ์ที่สำคัญจำนวน 18 กฎ โดยปัจจัยที่เกิดขึ้นบ่อยและมีความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมาย คือ การไม่มีสมาธิหรือไม่สามารถตัดสินใจ การพยายามฆ่าตัวตาย และความรู้สึกเศร้าหรืออยากร้องไห้ ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยส่งผลต่อสุขภาพจิตของแม่หลังคลอด ผลการวิจัยนี้ช่วยชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการดูแลสุขภาพจิตของแม่หลังคลอด การเข้าใจในอารมณ์และความคิดของแม่ และการป้องกันความเสี่ยงจากปัจจัยดังกล่าว ทั้งนี้ ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวแบบคัดกรองภาวะซึมเศร้าหลังคลอด รวมถึงการพัฒนาวิธีการให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดความเสี่ยงและยกระดับคุณภาพชีวิตของคุณแม่และลูกน้อยในระยะยาว

คำสำคัญ: ภาวะซึมเศร้าหลังคลอด, ปัจจัยการเกิดภาวะซึมเศร้าหลังคลอด, การสร้างกฎความสัมพันธ์, เทคนิค Apriori

Abstract

Postpartum depression is a mental health condition that results from the abrupt hormonal fluctuations occurring during the postnatal period. This condition significantly affects the psychological well-being of mothers and directly impacts

¹ หน่วยวิจัยห้องปฏิบัติการมัลติเอเจนต์ ระบบอัจฉริยะ และการจำลองสถานการณ์ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม 44150

² วิทยาลัยการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น 40002

³ ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม 44150

⁴ ภาควิชาสื่ออนิเมต, คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม 44150

¹ Multi-agent Intelligent Simulation Laboratory (MISL) Research Unit, Department of Information Technology, Faculty of Informatics, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

² College of Computing, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002

³ Department of Information Technology, Faculty of Informatics, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

⁴ Department of New Media, Faculty of Informatics, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150

* Corresponding author, e-mail: worawith.s@msu.ac.th

the well-being of the infant, as well as the broader familial and social environment. This study aims to generate association rules and identify relevant factors that serve as preliminary data for the development of a screening tool for postpartum depression. This research employs the Apriori algorithm to identify association rules within a dataset sourced from the Kaggle platform. The dataset comprises 1,503 instances and includes ten relevant variables, which are age, feelings of sadness or tearfulness, fatigue, sleep disturbances, difficulties with concentration or decision-making, eating disturbances, feelings of guilt, social withdrawal, suicide attempts, and anxiety, which serves as the key response variable. Relying on data from a single source in the experiment presents limitations regarding the generalizability of the findings to a wider population. The performance of the association rules is evaluated by applying a minimum support threshold of 0.2 and a minimum confidence threshold of 0.2. The experimental results reveal 18 significant association rules. The most frequently occurring factors that exhibit strong relationships with the target variable are difficulty concentrating or making decisions, suicide attempts, and feelings of sadness or tearfulness. These three factors significantly affect the mental health of postpartum mothers. The findings of this study highlight the importance of supporting the mental health of postpartum mothers, understanding their emotions and thoughts, and preventing potential risks associated with these factors. The findings of this research apply to the design of a screening model for postpartum depression and the development of appropriate counseling and guidance strategies aimed at reducing risks and enhancing the long-term quality of life for both mothers and their infants.

Keywords: Postpartum depression, factors influencing postpartum depression, association rule, Apriori technique

บทนำ

ความวิตกกังวล (Feeling Anxious) สภาวะทางอารมณ์ที่บุคคลรู้สึกไม่สบายใจซึ่งอาจเกิดขึ้นชั่วคราวหรือเป็นระยะยาว เมื่อความวิตกกังวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือรุนแรงอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพจิตและกลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่น่าไปสู่การเกิดภาวะโรคซึมเศร้า (Tianyi *et al.*, 2022) ภาวะวิตกกังวลเป็นปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดความบกพร่องด้านการคิด การตัดสินใจ และสมาธิ อาการที่เกิดความวิตกกังวลเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโรคซึมเศร้าไม่ว่าจะเป็นโรคซึมเศร้าที่เกิดจากการเจ็บป่วยในระยะยาว ความล้มเหลวต่างๆ ในชีวิต การสูญเสียสิ่งอันเป็นที่รักไปอย่างกะทันหัน และการเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมนจากการคลอดบุตร เป็นต้น (Hannon *et al.*, 2023; Jiayuan *et al.*, 2025; Rabinowitz *et al.*, 2023) อาการเหล่านี้จะส่งผลให้ระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ทำงานผิดปกติและอาจนำไปสู่ความรู้สึกสิ้นหวัง เบื่อหน่ายในที่สุดก็เกิดภาวะซึมเศร้า ความวิตกกังวลจะกระตุ้นให้ร่างกายหลั่งฮอร์โมนความเครียดซึ่งเกี่ยวข้องกับอารมณ์และความสุข บุคคลที่มีความวิตกกังวลอย่างมากและระยะยาวอาจทำให้มีรูปแบบความคิดเชิงลบต่อสิ่งรอบตัว ซึ่งอาจพัฒนาเป็นรูปแบบความคิดของโรคซึมเศร้า (Andersson *et al.*, 2023; van der Hoeven *et al.*, 2025)

กรณีของคุณแม่หลังคลอดการที่จะเกิดภาวะโรคซึมเศร้าหลังคลอด (Postpartum Depression: PPD) (Kawajiri

et al., 2025) เนื่องมาจากความกังวลในการดูแลทารกแรกเกิด และระดับฮอร์โมนลดลงอย่างรวดเร็วหลังคลอด จึงส่งผลกระทบต่อสารสื่อประสาทในสมอง ภาวะอารมณ์เศร้าหลังคลอด อาจมีอาการตั้งแต่ 2-3 วันแรกหลังคลอดบุตร จนถึง 1-2 สัปดาห์ (Fitzpatrick & Whitfield, 2025) อาการมักแสดงในช่วงสัปดาห์แรก ๆ หลังคลอด ซึ่งอาการที่พบได้บ่อย เช่น อารมณ์แปรปรวนรุนแรง วิตกกังวลอย่างหนัก ร้องไห้บ่อย ไม่มีปฏิสัมพันธ์กับคนในครอบครัวหรือเพื่อน เป็นต้น เมื่อคุณแม่หลังคลอดเข้าสู่ภาวะของความวิตกกังวลที่ส่งผลกระทบต่ออารมณ์และสภาพจิตใจจนนำไปสู่ความเสียหายที่เกิดจากภาวะซึมเศร้าหลังคลอด (Andrei *et al.*, 2023) โดยภาวะโรคซึมเศร้านี้ ได้ส่งผลกระทบเป็นวงกว้าง ทั้งต่อสุขภาพกายและใจ พัฒนาการตามวัยของลูกน้อย การดำรงชีวิต และความสัมพันธ์กับคนในครอบครัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบที่เกิดกับทารกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพัฒนาการทางอารมณ์และพฤติกรรมของเด็ก เด็กอาจมีอาการไม่คงที่เนื่องจากรับรู้ความเครียดจากแม่ซึ่งส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตและพัฒนาการทางสมอง (Hogh *et al.*, 2025) จากการศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับอาการโรคซึมเศร้าหลังคลอดที่ส่งผลกระทบต่อคุณแม่ บุตร และคนในครอบครัว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดโรคซึมเศร้าหลังคลอดบุตร โดยในการทดลองมีปัจจัยเป้าหมาย คือ Feeling anxious เป็นปัจจัยหลักในการหาความสัมพันธ์ เพื่อ

ที่จะได้ประเมินได้ว่าปัจจัยใดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอาการวิตกกังวลหรือทำให้เกิดอาการวิตกกังวล หากแม่มีอาการวิตกกังวลมากอาจส่งผลกระทบต่อการพูดคุยหรือส่งเสริมพัฒนาการของลูก ซึ่งลดโอกาสที่ลูกจะได้รับการกระตุ้นด้านภาษาทำให้เด็กพัฒนาการที่ช้าไม่ตรงตามวัยได้ (Krzeczkowski *et al.*, 2025)

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์ร่วมกับการเกิดอาการวิตกกังวลของคุณแม่หลังคลอดเป็นปัจจัยเป้าหมายหลัก โดยใช้วิธีการ Association Rules ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่จะนำไปสู่ปัจจัยที่เกิดขึ้นมาหาความเกี่ยวข้องที่มักจะเกิดร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย โดยใช้วิธีการ Association Rules เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Unsupervised Learning ที่มีเป้าหมายเพื่อค้นหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นร่วมกันบ่อยครั้งระหว่างปัจจัยต่างๆ (Rojarath *et al.*, 2025) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเพื่อสร้างแบบสอบถามในการคัดกรองคุณแม่หลังคลอดบุตร การรับรู้ปัจจัยที่ทำให้เกิดความกังวลและนำไปสู่ภาวะโรคซึมเศร้าตั้งแต่เนิ่น ๆ จะช่วยให้ผู้ดูแลสามารถวางแผนการรักษาที่เหมาะสมเพื่อควบคุมรักษาอาการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งปัจจัยปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้น ผู้ทำวิจัยต้องการที่จะวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันที่เกี่ยวกับแม่หลังคลอดที่มีอาการซึมเศร้า ใช้กฎและปัจจัยที่ค้นพบเพื่อพัฒนาเป็นตัวแบบในการคัดกรองกลุ่มแม่หลังคลอด เมื่อได้ปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกันสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อเป็นตัวแบบในการดูแลหรือให้คำปรึกษาเบื้องต้นกับทั้งแพทย์ผู้ดูแลเกี่ยวกับสุขภาพจิตและคนในครอบครัว นอกจากนี้ ยังช่วยระบุปัจจัยสำคัญที่ควรได้รับการเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิดในกลุ่มแม่หลังคลอด เพื่อป้องกันและลดความรุนแรงของภาวะซึมเศร้าในระยะยาว ปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกับความวิตกกังวลยังเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการสังเกตตนเองเมื่อเกิดสภาวะทางอารมณ์หรือพฤติกรรมที่ผิดปกติแตกต่างไปจากเดิมและสามารถเป็นข้อมูลช่วยให้แพทย์หรือครอบครัวสามารถระบุผู้มีความเสี่ยงได้ก่อนที่จะเข้ารับการรักษาจากแพทย์เฉพาะทาง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ภาวะซึมเศร้าหลังคลอด (Postpartum Depression)

ภาวะซึมเศร้าหลังคลอดเกิดขึ้นในระยะเวลาหลังการคลอด โดยสามารถเกิดได้ทั้งในผู้หญิงที่เคยมีและไม่เคยมีประสบการณ์การคลอดมาก่อน (Suebanun *et al.*, 2024)

ภาวะนี้มีผลกระทบทั้งด้านจิตใจและพฤติกรรม เช่น ความรู้สึกเศร้าหรือท้อแท้ ความสับสน และการขาดความสนใจในกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและการดูแลทารกหากไม่ได้รับการรักษาอย่างเหมาะสม

อาการของภาวะซึมเศร้าหลังคลอดประกอบด้วย ความผิดปกติด้านอารมณ์ พฤติกรรม และความคิด เช่น ปัญหาในการนอนหลับ การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมมารับประทานอาหาร และการลดความสนใจในกิจกรรมต่าง ๆ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อทั้งแม่และลูก

ตามข้อมูลจากงานวิจัย ภาวะซึมเศร้าหลังคลอดมีความสำคัญในแง่สุขภาพจิตของผู้หญิงหลังคลอด โดยพบในผู้หญิงประมาณ 13-19% ภาวะนี้มีความแตกต่างจากความเศร้าชั่วคราวหลังคลอด (Baby Blues) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วง 10 วันแรกและมักหายไปเอง ในทางกลับกันภาวะซึมเศร้าหลังคลอดเป็นภาวะที่มีความรุนแรงและอาจดำเนินต่อเนื่องหากไม่ได้รับการรักษาภาวะซึมเศร้าหลังคลอดถูกจัดอยู่ในประเภทภาวะซึมเศร้าที่เกี่ยวข้องกับการตั้งครรภ์และหลังคลอดตาม DSM-5 และถูกกำหนดว่าอาการเริ่มต้นในช่วงหกสัปดาห์แรกหลังคลอดตาม ICD (Hamtanon *et al.*, 2022; Stewart & Vigod, 2016)

2. กฎความสัมพันธ์ (Association Rule)

เทคนิคการหาความสัมพันธ์ การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มชุดข้อมูลที่มี ค้นหาในส่วนของข้อมูลว่าในส่วนการเกิดขึ้นของข้อมูลใดมีการเกิดขึ้นพร้อมกัน กฎความสัมพันธ์หรือความเชื่อมโยงระหว่างสิ่งสำคัญสองอย่างขึ้นไปในลักษณะใดก็ได้ เช่น การเชื่อมโยงระหว่างสถานที่และเหตุการณ์ การเชื่อมโยงระหว่างคำศัพท์ และความหมายหรือการเชื่อมโยงระหว่างคุณสมบัติของวัตถุกับการใช้งานของพวกวัตถุนั้น ๆ (Hamdad & Benatchba, 2021)

ตัวอย่างของการค้นหากฎความสัมพันธ์ 1) การหา Frequent Itemsets คือกลุ่มของรายการที่มีค่าสนับสนุน (Support) มากกว่าหรือ เท่ากับค่าสนับสนุนขั้นต่ำ (Minimum Support) โดยสับเซตของ Frequent Itemsets จะเป็น Frequent Itemsets เช่น ถ้า เป็น Frequent Itemsets และต้องเป็น Frequent Item ด้วยเพราะว่า เป็น subset ของ และด้วย 2) การสร้างกฎความสัมพันธ์จาก Frequent Itemsets ที่ได้จากการดำเนินการในขั้นตอนที่ 1 จะยอมรับกฎความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นมากที่สุดต่อเมื่อ สร้างกฎความสัมพันธ์ขึ้นมาโดยคำนวณค่าความเชื่อมั่น (Confidence) ของกฎต่างๆ โดยใช้สูตร

$$\begin{aligned} \text{Confidence}(A \rightarrow B) \\ = \text{Support}(A \cup B) / \text{Support}(A) \end{aligned} \quad (1)$$

กฎ $A \rightarrow B$ จะมีความเชื่อมั่นเมื่อเห็น เกิดขึ้น แล้ว เกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นที่ รูปแบบทั่วไปของกฎความสัมพันธ์คือ $X \rightarrow Y$ โดยที่ X เป็นเงื่อนไข และ Y เป็นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

ในส่วนค่าสนับสนุนวัดความน่าจะเป็นของรายการของข้อมูลที่เกิดพร้อมกันเทียบกับรายการทั้งหมด (Hamdad & Benatchba, 2021; Rojarath et al., 2024) ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Support}(\text{ItemA} \rightarrow \text{ItemB}) = \\ \frac{\text{The co-occurrence frequency of X and Y}}{\text{The total number of transactions}} \end{aligned} \quad (2)$$

ในส่วนค่าความเชื่อมั่นวัดความน่าจะเป็นเมื่อเกิดเหตุการณ์ (X) แล้วจะเกิดอีกเหตุการณ์ตามมา (Y) ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Confidence}(\text{ItemA} \rightarrow \text{ItemB}) = \\ \frac{\text{The co-occurrence count of X and Y}}{\text{The number of transactions that contain X}} \end{aligned} \quad (3)$$

3. ขั้นตอนวิธี Apriori

วิธี Apriori นิยมใช้ในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยใช้การนับ Transaction (T) และการสร้าง Itemset และตรวจสอบ Itemset ที่ปรากฏขึ้นทีละลำดับ โดยเริ่มจาก Itemset ที่มีสมาชิกเท่ากับหนึ่ง หาก Itemset ใดมีค่าสนับสนุนน้อยกว่าค่าสนับสนุนที่กำหนดก็ตัด Itemset นั้นออกไปสร้าง Itemset ในลำดับถัดไป การทำงานของเทคนิค Apriori จะทำไปเรื่อยๆ จนไล่ไปทุกลำดับ หรือไม่เหลือ Items ที่จะสร้างในลำดับถัดไป (Delos Arcos & Hernandez, 2019)

วิธี Apriori เป็นเทคนิคที่ใช้ในการค้นหาความสัมพันธ์ในชุดข้อมูลที่มีการจัดเก็บในรูปแบบรายการ โดยอาศัยหลักการตัดเซตรายการที่มีความถี่ต่ำออก เพื่อค้นหาเซตรายการที่ปรากฏร่วมกันบ่อยและนำมาสร้างกฎความสัมพันธ์ ขั้นตอนการดำเนินการประกอบด้วยการค้นหาเซตรายการที่มีความถี่มากกว่าค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่กำหนด จากนั้นจึงสร้างกฎความสัมพันธ์จากเซตรายการดังกล่าว โดยกฎที่สร้างขึ้นต้องมีค่าความเชื่อมั่นสูงกว่าหรือเท่ากับค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำที่กำหนดไว้ วิธี Apriori สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับฐานข้อมูลที่มีลักษณะธุรกรรมเพื่อค้นหารูปแบบที่พบได้บ่อย ซึ่งช่วยลดความขัดแย้งระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและเพิ่มประสิทธิภาพ

ในการตัดสินใจ (Harikumar & Dilipkumar, 2016)

วิธี Apriori ยังได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยเกี่ยวกับการค้นหาความสัมพันธ์ในชุดข้อมูล โดยเริ่มต้นด้วยการค้นหาเซตรายการที่มีความถี่มากกว่าค่าสนับสนุนขั้นต่ำ เซตรายการย่อยที่มีความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในการสร้างเซตรายการที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยกระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนไม่สามารถสร้างเซตรายการใหม่ได้ ข้อดีของเทคนิค Apriori คือความสามารถในการทำงานได้ดีในกรณีที่ค่าสนับสนุนขั้นต่ำถูกตั้งค่าให้สูง ชุดข้อมูลมีขนาดเล็ก หรือจำนวนเซตรายการไม่มาก นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังสามารถค้นหาความสัมพันธ์ได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบ

4. วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Wrapper

วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Wrapper จะทำการประเมินชุดของคุณลักษณะที่เป็นไปได้ด้วยการสร้างและประเมินซ้ำหลายรอบโดยใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Algorithm) และเลือกชุดคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธี Wrapper มีหลักการในการคัดเลือกคุณลักษณะแบบเพิ่มคุณลักษณะ (Forward Selection) และแบบลบคุณลักษณะ (Backward Elimination) ทีละรายการตามลำดับ (Kaur et al., 2022; Priya & Karthika, 2023) หากมีหลายชุดคุณลักษณะที่ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดเท่ากัน ระบบจะเลือกชุดที่มีจำนวนคุณลักษณะน้อยที่สุด ผ่านกระบวนการวนซ้ำอย่างต่อเนื่อง ชุดคุณลักษณะจะถูกปรับให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูล (Hu et al., 2024) วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Wrapper มีความขึ้นอยู่กับตัวแบบการจำแนกประเภทที่เลือกใช้ใน คุณลักษณะที่ถูกเลือกจะถูกป้อนเข้าสู่โมเดลการเรียนรู้ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเพื่อประเมินประสิทธิภาพของชุดคุณลักษณะนั้น (Song et al., 2025)

5. การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยเทคนิค Gain Ratio

เทคนิค Gain Ratio หรือค่าอัตราส่วนเกน เป็นเทคนิคการเลือกคุณลักษณะที่ถูกพัฒนามาจากวิธีการ Information Gain เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของมิติข้อมูล หลักการทำงานของ Gain Ratio เป็นการนำค่าที่ได้จาก Information Gain ส่วนด้วย Split Information เพื่อหลีกเลี่ยงการเลือกคุณลักษณะที่มีค่าข้อมูลแตกต่างหลากหลายมากเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิด Overfitting ได้ (Gao et al., 2024) สมการดังนี้

$$\text{GainRatio}(A) = \frac{IG(A)}{\text{SplitInfo}(A)} \quad (4)$$

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Biilah *et al.* (2022) ใช้ Apriori Algorithm วิเคราะห์ข้อมูลจากนักศึกษา 539 คน เพื่อระบุปัจจัยเสี่ยงภาวะซึมเศร้า พบปัจจัยสำคัญ 18 รายการ และสร้างกฎความสัมพันธ์ 8 ชุดที่ช่วยอธิบายความเชื่อมโยงกับภาวะนี้ได้อย่างชัดเจน ผลการวิจัยชี้ว่าเทคนิคกฎความสัมพันธ์มีประสิทธิภาพในการประเมินและเข้าใจความเสี่ยงของภาวะซึมเศร้าเพื่อพัฒนาการแทรกแซงในอนาคต สอดคล้องกับงานวิจัยการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์เชิงบวกและเชิงลบสำหรับการวิเคราะห์สุขภาพจิตของนักศึกษาในวิทยาลัย เพื่อคัดกรองกฎความสัมพันธ์เชิงบวกและลบจากข้อมูลสุขภาพจิตของนักศึกษา โดยใช้แบบประเมิน SCL-90 ผลลัพธ์ช่วยระบุปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความไวต่อความรู้สึกและภาวะซึมเศร้า ซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบแผนการแทรกแซงด้านสุขภาพจิต (Zhao *et al.*, 2017) อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลเพื่อวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ของจุดฝังเข็มที่ใช้ในการรักษาภาวะซึมเศร้า โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบสุ่มควบคุม (RCT) งานวิจัยพบจุดฝังเข็มที่มีความสัมพันธ์สูง เช่น Baihui (GV 20) และ Neiguan (PC 6) พร้อมทั้งสร้างเครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างโรคและจุดฝังเข็ม (Fan *et al.*, 2023)

งานวิจัยของ Shin and Hur (2019) ได้ใช้ข้อมูลจากระบบ Pregnancy Risk Assessment Monitoring System (PRAMS) จำนวน 72,541 รายการ เพื่อพัฒนาโมเดลพยากรณ์ภาวะซึมเศร้าหลังคลอดโดยใช้เทคนิค Machine Learning และ CN2 Rule Inducer Algorithm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเสี่ยง เช่น อายุ เชื้อชาติ สถานภาพสมรส ดัชนีมวลกาย และประวัติภาวะซึมเศร้าก่อนหน้า โมเดลที่ดีที่สุดในงานนี้ให้ความแม่นยำ 77.7% งานวิจัยของ Nasim *et al.* (2024) ได้พัฒนาโมเดล MDKR (Meta-Learner) สำหรับการพยากรณ์ภาวะซึมเศร้าหลังคลอด โดยใช้ข้อมูลจากแบบสอบถามที่รวบรวมจากแม่ 1,503 คน ผ่านแพลตฟอร์มดิจิทัล โมเดลนี้ใช้การประมวลผลข้อมูลผ่าน Decision Tree, K-Nearest Classifier, และ Random Forest ก่อนเข้าสู่ Multi-Layer Perceptron เพื่อการพยากรณ์ ผลลัพธ์แสดงความแม่นยำสูงถึง 99% ซึ่งดีกว่าโมเดลที่มีอยู่เดิม และงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2021) พัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึม Machine Learning เพื่อพยากรณ์ความเสี่ยงของภาวะซึมเศร้าหลังคลอด โดยใช้ข้อมูลจาก Electronic Health Records (EHRs) ของผู้หญิง 69,169 คน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการพยากรณ์ ได้แก่ ประวัติสุขภาพจิต ภาวะแทรกซ้อนทางสูติกรรม และ

ลักษณะทางประชากร อัลกอริทึมที่ดีที่สุดให้ค่า AUC สูงถึง 93.7%

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย (Research Methodology)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ชุดข้อมูลเพื่อศึกษาทฤษฎีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการเกิดภาวะซึมเศร้าหลังคลอด โดยมีการดำเนินการวิจัยผ่านขั้นตอนดังนี้

1. ชุดข้อมูล (Dataset)

ในงานวิจัยนี้ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองเป็นชุดข้อมูลที่ได้มาจากเว็บไซต์ Kaggle: (<https://www.kaggle.com/datasets/parvezalmuqtadir2348/postpartum-depression>) ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย “ความผิดปกติทางจิตของสตรีมีครรภ์” เป็นการเก็บข้อมูลแบบสอบถามที่จัดทำผ่าน Google Form ชุดข้อมูลประกอบไปด้วยข้อมูลจำนวน 1,503 รายการ ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลจากจากโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง โดยใช้แบบสอบถามที่จัดทำผ่าน Google Form มีคุณลักษณะทั้งหมด 10 รายการและ 1 คุณลักษณะเป้าหมาย

2. ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล (Data Understanding)

ขั้นตอนแรกคือการรวบรวมและทำความเข้าใจข้อมูล โดยผู้วิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาและกำหนดเป้าหมายในการแก้ไขปัญหา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยถูกคัดเลือกมา 10 ปัจจัย ได้แก่ Age, Feeling sad or Tearful, Easily tired, Trouble sleeping at night, Problems concentrating or making decision, Overeating or loss of appetite, Feeling of guilt, Rarely speaks to anyone, Suicide attempt และ Feeling anxious ซึ่งเป็นปัจจัยเป้าหมายที่ต้องการนำมาหาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับภาวะซึมเศร้าหลังคลอด เช่น ปัจจัยทางสังคม ปัจจัยทางสุขภาพ และประวัติการเจ็บป่วยของมารดา สำหรับชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้รวบรวมมาจากแหล่งข้อมูลสาธารณะบนเว็บไซต์ Kaggle ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่มีข้อมูลหลากหลายสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึก ข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการค้นหาทฤษฎีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเสี่ยงของภาวะซึมเศร้าหลังคลอด

3. การเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing)

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลในงานวิจัย ชุดข้อมูลเป็นชุดข้อมูลสาธารณะสามารถนำไปใช้ในการทำวิจัยได้ โดยการดำเนินการเตรียมข้อมูลมีขั้นตอนดังนี้

3.1 การจัดการค่าว่างของข้อมูล (Remove Missing Value) มีการจัดการ Missing Value ด้วยการลบแถวที่เป็นค่าว่างออก และเนื่องจากจำนวนแถวที่มีค่าว่างที่ไม่ปรากฏข้อมูลมีจำนวนน้อยหลักสิบจากทั้งหมดหลักพันแถวจึงใช้วิธีการลบ Blank Space ในเซลล์ที่เป็นค่าว่างได้ หลังจากการจัดการ Missing Value แล้วทำให้ชุดข้อมูลมีจำนวน 1,491 แถว จากเดิม 1,503 แถว

3.2 การจัดการค่าผิดปกติ (Outlier Detection) เป็นกระบวนการที่ระบุการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากรูปแบบปกติ จากชุดข้อมูลเดิมในส่วนปัจจัยด้าน อายุ (Age) ขอบเขตของช่วงอายุมีความผิดปกติในการเก็บข้อมูล ซึ่งช่วงอายุแบ่งเป็น 5 ลำดับ ได้แก่ 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50 ปี จะเห็นว่าขอบเขตระหว่างอายุที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดมีการเก็บข้อมูลของช่วงอายุที่ทับซ้อนกันจึงได้มีการปรับช่วงอายุใหม่ ได้แก่ 25-29, 30-34, 35-39, 40-44, 45-50 ปี

3.3 การแบ่งค่าต่อเนื่องข้อมูล (Data Conversion) ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการแบ่งค่าต่อเนื่องออกเป็นช่วงเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และลดผลกระทบของค่าผิดปกติด้วยเทคนิค Binning Method ตัวอย่างเช่น มีการทำ Binning ของข้อมูลอายุ โดยการปรับขอบเขตของช่วงอายุใหม่ เป็นต้น โดยใช้หลักการแบ่งช่วงข้อมูลตามเกณฑ์ตามหลักการของวิธี

Equal-Width Binning เป็นการแบ่งช่วงข้อมูลออกเป็นช่วงที่มีความกว้างเท่ากัน

4. ขั้นตอนการสร้างกฎความสัมพันธ์ (Process of Building Association Rules)

ขั้นตอนการสร้างกฎความสัมพันธ์เป็นการนำข้อมูลผ่านขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจนได้ข้อมูลที่สมบูรณ์แล้วมาสร้างกฎความสัมพันธ์ ใช้งานวิจัยได้ใช้วิธีการ Apriori ในการหากฎความสัมพันธ์ของ Frequent Itemset จากชุดข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter Setting)

ขั้นตอนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ สำหรับการสร้างกฎความสัมพันธ์มี 2 ค่า ได้แก่ ค่าสนับสนุน (Support) และค่าความเชื่อมั่น (Confidence) ในการทดลองนี้ ได้มีการทดสอบกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์และจำนวนของกฎความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับจุดประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งการกำหนดค่า Support และค่า Confidence มีความสำคัญที่ส่งผลต่อทั้งจำนวนกฎที่ได้และคุณภาพของกฎที่จะต้องนำไปแปลผล การทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ แสดงดัง Table 1

Table 1 illustrates the number of association rules generated using the Apriori method based on different support and confidence values

Times	Support Values	Confidence Values	Number of Rules
#1	0.8	0.75	0
#2	0.7	0.6	0
#3	0.65	0.5	0
#4	0.5	0.4	0
#5	0.4	0.3	0
#6	0.3	0.2	8
#7	0.2	0.5	50
#8	0.2	0.2	76

จาก Table 1 แสดงให้เห็นถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อสร้างกฎความสัมพันธ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนด 2 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าสนับสนุน และค่าความเชื่อมั่น โดยในการทดสอบมีการประมวลผลเพื่อสร้างกฎความสัมพันธ์จำนวน 8 รอบด้วยกัน ในแต่ละรอบจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้กฎความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปวิเคราะห์

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่ากฎความสัมพันธ์เกิดขึ้นตั้งแต่รอบที่ 6 ที่มีการกำหนดค่า Support ที่ 0.3 และค่า Confidence ที่ 0.2 จึงสามารถเกิดกฎความสัมพันธ์ได้ มีจำนวน 8 กฎ และเมื่อทำการคัดเลือกกฎที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมาย Feeling Anxious จะได้กฎจำนวน 5 กฎ ซึ่งกฎที่ได้มีจำนวนน้อยเกินไปในการนำไปวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างปัจจัยความวิตกกังวลร่วมกับการเกิดปัจจัยอื่นๆ ดังนั้น

จึงได้เลือกการประมวลผลในรอบที่ 8 เป็นการกำหนดค่าที่ผู้วิจัยได้เลือกมาเพื่อสร้างเป็นกฎความสัมพันธ์ โดยกำหนดค่า Support ที่ 0.2 และค่า Confidence ที่ 0.2 ซึ่งมีจำนวน 76 กฎ เพื่อนำกฎที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

4.2 การสร้างกฎความสัมพันธ์ด้วยเทคนิค

Apriori (Building Association Rules with the Apriori Technique)

ขั้นตอนของการสร้างกฎความสัมพันธ์ โดยกฎที่ได้จะเกิดขึ้นจากปัจจัยที่พบร่วมกันบ่อย ในงานวิจัยได้ใช้วิธีการ Apriori ในการหาความสัมพันธ์ของ Frequent

Itemset จากชุดข้อมูล เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของอาการหรือพฤติกรรมที่ปรากฏร่วมกันบ่อยในกลุ่มตัวอย่างคุณแม่หลังคลอดที่มีอาการนำไปสู่ภาวะซึมเศร้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

4.2.1 การสร้างปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกัน

(Frequent Itemset)

โดยหลักการของวิธี Apriori ขั้นตอนนี้จะเป็นการค้นหาปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกันบ่อยที่ผ่านเกณฑ์ค่าสนับสนุนขั้นต่ำ ในงานวิจัยนี้มีการกำหนดค่า Support ต่ำสุดที่ 0.2

Table 2 illustrates the association rules obtained from non-value-based factor analysis

Rule No.	Association Rules	Confidence Values
1.	Overeating or loss of appetite=No, Feeling of guilt=No ==> Feeling anxious=Yes	0.95
2.	Feeling of guilt=No ==> Feeling anxious=Yes	0.89
3.	Feeling anxious=Yes ==> Feeling of guilt=Maybe	0.35

4.2.2 การสร้างกฎความสัมพันธ์ (Building Association Rules)

จาก Frequent Item ที่ได้จากขั้นตอนแรก ได้มีการสร้างกฎความสัมพันธ์ในรูปแบบ If-Then โดยมีรูปแบบของกฎความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 5

$$ItemA \rightarrow ItemB \quad (5)$$

$$[MinSupport, MinConfidence]$$

โดยจะคำนวณค่า Confidence ของแต่ละกฎ และเลือกเฉพาะกฎที่มีค่า Confidence สูงกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด ในงานวิจัยมีการทดลองเพื่อหาค่า Support และค่า Confidence ที่เหมาะสมหลายรอบ และได้เลือกการทดลองที่มีการกำหนดค่า Confidence ต่ำสุดที่ 0.2 ได้จำนวนกฎความสัมพันธ์ 76 กฎ

โดยปกติแล้วหลักเกณฑ์ในการเลือกใช้ฟารามิเตอร์ของวิธีการหาความสัมพันธ์ จากความสัมพันธ์ของ Frequent Item ที่เกิดขึ้นร่วมกัน ชุดข้อมูลสุขภาพที่มีการเก็บอาการของผู้ป่วยมักเป็นลักษณะข้อมูลกระจายโดยในผู้ป่วย 1 รายอาจมีปัจจัยอาการร่วมกันเพียงไม่กี่ปัจจัย หากมีการกำหนดค่า Support สูงไปก็จะไม่เกิดกฎความสัมพันธ์ขึ้น เมื่อกำหนดค่า Support และค่า Confidence ต่ำ จะทำให้เห็นภาพรวมของข้อมูลที่ต้องการและอาจจะมีบางกฎที่เป็นความสัมพันธ์เชิงลึกที่เป็นปัจจัยสำคัญ จากนั้นจะได้กฎ

ความสัมพันธ์ที่ผ่านค่า Confidence ขั้นต่ำ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย

ผลการทดลอง (Experimental Results)

งานวิจัยได้แบ่งการอธิบายผลการทดลองออกเป็น 4 ประเด็น ได้แก่ 1) กฎความสัมพันธ์จากวิธี Apriori 2) การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกับปัจจัยเป้าหมายของแม่หลังคลอดบุตร 3) กฎความสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น 4) การเปรียบเทียบกับวิธีการคัดเลือกคุณลักษณะอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธี Apriori (Analysis of Association Rules using the Apriori Technique)

การสร้างกฎความสัมพันธ์ที่กำหนดค่า Support = 0.2 และค่า Confidence = 0.2 ได้กฎความสัมพันธ์ทั้งหมด 76 ซึ่งกฎทั้งหมดที่ได้จะถูกพิจารณาในการคัดเลือกกฎตามเงื่อนไขในการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยเป้าหมายเป็นหลัก เนื่องจากสาเหตุหลักของการเกิดภาวะซึมเศร้าของแม่หลังคลอดมาจาก “ความวิตกกังวล” ดังนั้น จึงใช้ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยหลักในการวิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ ร่วมกัน เพื่อให้ได้ปัจจัยและจำนวนปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างแบบคัดกรองได้ ซึ่งจะแบ่งการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1.1 การวิเคราะห์ปัจจัยโดยไม่คำนึงถึงค่าข้อมูลของตัวแปร (Non-Value Based Factor Analysis)

กระบวนการนี้จะเป็นการคัดกรองกฎตามเงื่อนไขที่กฎนั้นจะเกิดความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยร่วมหนึ่งตัว (Single-Feature Associated) หรือกับปัจจัยหลายตัว (Multi-Feature Associated) แต่ต้องเกิดความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย โดยไม่ได้คำนึงถึงค่าข้อมูลและความเป็นไปได้ของกฎ โดยจะได้กฎความสัมพันธ์ทั้งหมด 40 กฎ แสดงดัง Table 2

Table 2 แสดงตัวอย่างของกฎที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัย Feeling anxious เมื่อพิจารณากฎความสัมพันธ์จะได้ว่า

กฎที่ 1 (Rule No.1) “**Overeating or loss of appetite=No, Feeling of guilt=No ==> Feeling anxious=Yes**” มีปัจจัยที่เกิดความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย 2 ปัจจัย คือ Overtreating or loss of appetite และ Feeling of guilt โดยแม่หลังคลอดที่มี 2 ปัจจัยนี้ร่วมกันมีแนวโน้มจะเกิดความวิตกกังวลสูงถึง 95% ของในชุดข้อมูลนี้ ดังนั้น เมื่อมีการคัดเลือกปัจจัยที่สำคัญจากทั้งหมด 40 กฎความสัมพันธ์ จะมีลำดับปัจจัยที่พบได้บ่อยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัย Feeling anxious ดังนี้

Table 3 illustrates the factor selection based on the number of frequent items using a non-value based technique

Order	Factors	Frequent Items
1.	Problems concentrating or making decision	10
2.	Suicide attempt	10
3.	Feeling of guilt	10
4.	Overtreating or loss of appetite	9
5.	Feeling sad or Tearful	4
6.	Easily tired	4
7.	Trouble sleeping at night	4
8.	Rarely speaks to anyone	2
9.	Age	0

จาก Table 3 แสดงการคัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมที่จะพิจารณาตามจำนวน Frequent Item สูงสุดตามลำดับ จากตารางแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่พบมากที่สุดและเกิดความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมายมี 3 ปัจจัย ได้แก่ Problems concentrating or making decision, Feeling of guilt, Suicide attempt แต่หากพิจารณาตามกฎที่ 1 (กฎที่ 1 จาก Table 2) จะเห็นว่าปัจจัย **Feeling of guilt = No** หมายความว่าจากกฎความสัมพันธ์ “ไม่มีอาการกินมากเกินไปหรือเบื่ออาหาร” และ “ไม่มีความรู้สึกผิด” มีแนวโน้มให้แม่หลังคลอด “เกิดความวิตกกังวล” เมื่อพิจารณาข้อมูลเชิงลึกจากความหมายของกฎที่ 1 กฎนี้มีความขัดแย้งกับแนวความคิดที่ว่า ความวิตกกังวลมักมาพร้อมกับความรู้สึกผิดอย่างมาก หรือทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการกินอย่างผิดปกติ เป็นต้น ปัจจัย **Feeling of guilt = No** เกิดขึ้นมากที่สุดแต่เกิดกับค่าข้อมูล No จึงไม่มีความหมายต่อการเกิดปัจจัยความวิตกกังวลที่เป็นปัจจัยเป้าหมาย

ดังนั้น การคัดเลือกคุณลักษณะนี้เป็นการคัดเลือกปัจจัยโดยไม่คำนึงถึงค่าข้อมูลของตัวแปร ซึ่งเป็นการเลือกปัจจัยจากการเกิดขึ้นในชุดข้อมูล โดยไม่ได้พิจารณาว่าค่าของปัจจัยนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเงื่อนไขกับตัวแปรเป้าหมายหรือไม่ จึงต้องมีขั้นตอนของการคัดกรองกฎความสัมพันธ์เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2 การวิเคราะห์ปัจจัยโดยคำนึงถึงค่าข้อมูลของตัวแปร (Value-based Factor Analysis)

เป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์คุณลักษณะโดยพิจารณาจากค่าที่เกิดขึ้นจริงและความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้กับปัจจัยเป้าหมาย เมื่อได้กฎที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมายแล้วต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกที่เกิดความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ ซึ่งจากทั้งหมด 40 กฎที่ได้นี้จึงมีกฎที่สามารถนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้กับปัจจัยเป้าหมายจำนวน 18 กฎ ดังตารางต่อไปนี้

Table 4 illustrates the association rules obtained from value-based factor analysis

Rule No.	Association Rules	Confidence Values
1.	Problems concentrating or making decision=Often Suicide attempt=No ==> Feeling anxious=Yes	0.91
2.	Problems concentrating or making decision=Often ==> Feeling anxious=Yes	0.84
3.	Easily tired=Yes ==> Feeling anxious=Yes	0.77
4.	Rarely speaks to anyone=Sometimes ==> Feeling anxious=Yes	0.75
5.	Suicide attempt=Yes ==> Feeling anxious=Yes	0.72
6.	Problems concentrating or making decision=Often ==> Feeling anxious=Yes Suicide attempt=No	0.67
7.	Feeling of guilt=Maybe ==> Feeling anxious=Yes	0.65
8.	Feeling sad or Tearful=Yes ==> Feeling anxious=Yes	0.64
9.	Feeling anxious=Yes Suicide attempt=No ==> Problems concentrating or making decision=Often	0.62
10.	Trouble sleeping at night=Two or more days a week ==> Feeling anxious=Yes	0.58
11.	Feeling anxious=Yes ==> Easily tired=Yes	0.43
12.	Feeling anxious=Yes ==> Rarely speaks to anyone=Sometimes	0.42
13.	Feeling anxious=Yes ==> Problems concentrating or making decision=Often	0.41
14.	Feeling anxious=Yes ==> Trouble sleeping at night=Two or more days a week	0.38
15.	Feeling anxious=Yes ==> Feeling of guilt=Maybe	0.35
16.	Feeling anxious=Yes ==> Feeling sad or Tearful=Yes	0.35
17.	Feeling anxious=Yes ==> Suicide attempt=Yes	0.34
18.	Feeling anxious=Yes ==> Problems concentrating or making decision=Often Suicide attempt=No	0.33

Table 4 แสดงให้เห็นกฎความสัมพันธ์ที่ผ่านการพิจารณาค่าของปัจจัยร่วมด้วย ซึ่งในขั้นตอนนี้หากกฎความสัมพันธ์เกิดปัจจัยที่มีค่าข้อมูลเป็น No และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกร่วมกับความสัมพันธ์ที่เกิดกับปัจจัยเป้าหมายแล้วไม่มีผลต่อการนำปัจจัยนั้นไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคัดกรองผู้ป่วยซึมเศร้าจะทำการตัดปัจจัยที่มีค่าข้อมูลเป็น No ออกไป แต่จะมีกรณียกเว้น 1 กรณีคือ จะไม่ตัดปัจจัย "Suicide attempt" ออกถึงแม้ว่าจะมีค่าข้อมูลเป็น No เนื่องจากปัจจัย Suicide attempt หรือการพยายามฆ่าตัวตาย

เป็นปัจจัยที่สามารถใช้ในการแบ่งระดับอาการของผู้ป่วยซึมเศร้าหลังคลอดได้ ดังตัวอย่างกฎความสัมพันธ์ต่อไปนี้

กฎที่ 17 (Rule No.17) "**Feeling anxious=Yes ==> Suicide attempt=Yes**" แปลความหมายของกฎได้ว่า "เมื่อมีความวิตกกังวลก็มีแนวโน้มที่จะพยายามฆ่าตัวตาย" จากตารางจะเห็นได้ว่ากฎที่ 17 มีค่าความเชื่อมั่นของกฎค่อนข้างน้อย คิดเป็น 34% ของบุคคลทั้งหมดในชุดข้อมูลนี้ จึงเป็นกรณีที่พบในส่วนน้อยแต่มีนัยทางคลินิกสูง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกิดขึ้นไม่บ่อยแต่เป็นตัวชี้วัด

ที่สำคัญของภาวะโรคซึมเศร้า ดังนั้น เมื่อมีการคัดเลือกปัจจัยที่สำคัญจากทั้งหมด 18 กฎความสัมพันธ์ จะมีลำดับปัจจัยที่

พบได้บ่อยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัย Feeling anxious แสดงดัง Table 5

Table 5 illustrates the factor selection based on the number of frequent items using a value-based technique

Order	Factors	Frequent Items
1.	Problems concentrating or making decision	6
2.	Suicide attempt	6
3.	Feeling sad or Tearful	6
4.	Feeling of guilt	2
5.	Trouble sleeping at night	2
6.	Easily tired	2
7.	Rarely speaks to anyone	2
8.	Overeating or loss of appetite	0
9.	Age	0

Table 5 แสดงการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธี Value-Based Factor ที่คัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมและเกิดความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมายซึ่งจะพิจารณาตามจำนวน Frequent Item สูงสุด โดยปัจจัยที่พบมากที่สุดมี 3 ปัจจัย ได้แก่ Problems concentrating or making decision, Suicide attempt และ Feeling sad or Tearful แสดงว่าทั้ง 3 ปัจจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์สำหรับการสร้างแบบคัดกรองเบื้องต้นได้เหมาะสม นอกจากนี้จากการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธี Value-Based Factor ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ไม่มีความเกี่ยวข้องต่อการพิจารณาอาการที่จะบ่งชี้ภาวะซึมเศร้าของแม่หลังคลอดได้ ได้แก่ ปัจจัย Overeating or loss of appetite และ Age ซึ่งไม่พบการเกิดความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย

2. กฎความสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้สำหรับ การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น (Applying Association Rules in Preliminary Data Analysis)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการนำกฎความสัมพันธ์ จากวิธี Value-Based Factor ทำการออกแบบรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อคัดกรองภาวะอาการของโรคก่อนเข้าปรึกษาแพทย์เฉพาะทางด้านสุขภาพจิต ซึ่งในงานวิจัยได้ออกแบบรูปแบบการวิเคราะห์ปัจจัยออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์กลุ่มอาการร่วม Anxious แบบปัจจัยเดียว

เป็นรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลจากปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกันในกฎความสัมพันธ์ ซึ่งจะเป็นปัจจัยเดี่ยวที่

เกิดความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมายโดยตรง เช่น กฎที่ 8, 11, 13 (กฎจาก Table 4) ดังนี้

กฎที่ 8. Feeling sad or Tearful=Yes ==> Feeling anxious=Yes

กฎที่ 11. Feeling anxious=Yes ==> Easily tired=Yes

กฎที่ 13. Feeling anxious=Yes ==> Problems concentrating or making decision=Often

จากตัวอย่างกฎความสัมพันธ์แสดงว่า “ความวิตกกังวล” มักเกิดร่วมกับ “ความรู้สึกเศร้า อาการเหนื่อยง่าย และการมีปัญหาเกี่ยวกับสมาธิ การตัดสินใจ รู้สึกเสียใจและร้องไห้บ่อยๆ มีอาการนอนไม่หลับบ้างเป็นครั้งคราว”

2.2 การวิเคราะห์แนวทางเฝ้าระวังกลุ่มเสี่ยงของแม่หลังคลอด

จากการทดลองแสดงดัง Table 4 จะมีกฎความสัมพันธ์ที่บ่งชี้ความสัมพันธ์ในระดับเสี่ยง ซึ่งการออกแบบรูปแบบการวิเคราะห์จะพิจารณาที่กฎความสัมพันธ์ที่มีปัจจัย Suicide attempt อยู่ในกฎความสัมพันธ์ ทั้งที่มีค่าข้อมูลเป็น Suicide attempt = No และ Suicide attempt = Yes ดังนี้

กฎที่ 1. Problems concentrating or making decision=Often Suicide attempt=No ==> Feeling anxious=Yes

กฎที่ 5. Suicide attempt=Yes ==> Feeling anxious=Yes

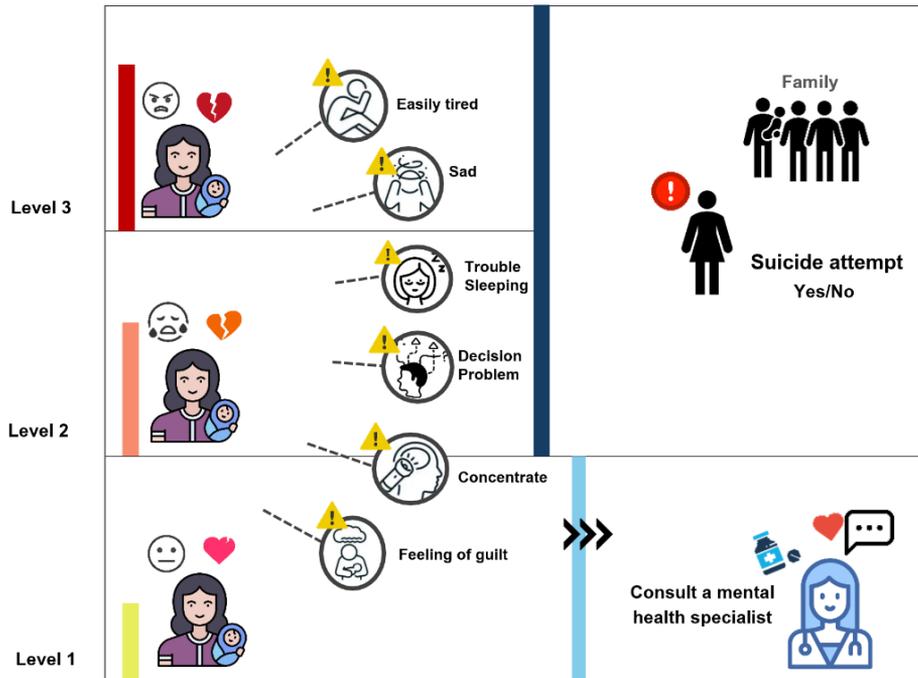


Figure 1 Classification of postpartum depression levels based on association rules

กฎที่ 6. Problems concentrating or making decision=Often ==> Feeling anxious=Yes Suicide attempt=No

กฎที่ 7. Feeling anxious=Yes Suicide attempt=No ==> Problems concentrating or making decision=Often

กฎที่ 17. Feeling anxious=Yes ==> Suicide attempt=Yes

กฎที่ 18. Feeling anxious=Yes ==> Problems concentrating or making decision=Often Suicide attempt=No

เมื่อพิจารณาจากกฎความสัมพันธ์ทั้งหมดที่เกิดความสัมพันธ์กับปัจจัย Suicide attempt จะเห็นว่าทุกกฎปัจจัย “Suicide attempt” จะเกิดร่วมกับปัจจัย “Feeling anxious” เสมอและมีเพียง 2 กฎเท่านั้นที่มีความสัมพันธ์กับความพยายามฆ่าตัวตาย (Suicide attempt = Yes) ได้แก่

กฎที่ 5. Suicide attempt=Yes ==> Feeling anxious=Yes

กฎที่ 17. Feeling anxious=Yes ==> Suicide attempt=Yes

กฎข้อที่ 5 และ 7 จาก Table 4 แปลความหมายได้ว่า “สาเหตุของการพยายามฆ่าตัวตายมีแนวโน้มที่เกิดจากความวิตกกังวล” และ “ความวิตกกังวลมีแนวโน้มทำให้พยายามฆ่าตัวตาย” จึงอาจกล่าวได้ว่า Suicide attempt

มีความสัมพันธ์ร่วมกับ Feeling anxious ทุกกรณี กฎเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงระหว่างอาการทางจิตใจ เช่น ความเศร้า ความวิตกกังวล หรือปัญหาการตัดสินใจ กับภาวะความเสี่ยงสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อชีวิตของคุณแม่หลังคลอด การออกแบบรูปแบบการวิเคราะห์ที่เน้นการระบุและจำแนกกลุ่มที่มีลักษณะร่วมกับปัจจัย Suicide attempt จึงถือเป็นแนวทางสำคัญในการจัดกลุ่มผู้ที่ควรได้รับการเฝ้าระวังและให้การดูแลเชิงลึกอย่างใกล้ชิดในระยะหลังคลอด

จากความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ได้จากกฎความสัมพันธ์ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการสร้างแบบประเมินแบบแบ่งระดับได้ เช่น การจัดกลุ่มของผู้ที่มีอาการภาวะโรคซึมเศร้าให้อยู่ในระดับเล็กน้อย ระดับปานกลาง ระดับสูง (ส่งต่อผู้เชี่ยวชาญทันที) ดังเช่นตัวอย่างการออกแบบต่อไปนี้

จาก Figure 1 เป็นการแบ่งระดับกลุ่มภาวะอาการโรคซึมเศร้า ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำแนกระดับความรุนแรงของกลุ่มอาการผ่านการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

- 1) กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นๆ: ระดับเล็กน้อย
- 2) กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นไม่พยายามฆ่าตัวตาย: ระดับเฝ้าระวัง
- 3) กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวลหรือความวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นพยายามฆ่าตัวตาย: กลุ่มเสี่ยง มีรายละเอียดดังนี้

จากภาพแสดงให้เห็นถึงการแบ่งระดับผู้ป่วยภาวะซึมเศร้าหลังคลอดจากกฎความสัมพันธ์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ดังต่อไปนี้

ระดับที่ 1 (Level 1): กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นๆ (ระดับเล็กน้อย)

แม่หลังคลอดที่จัดอยู่ในระดับ 1 เป็นผู้ป่วยภาวะซึมเศร้าหลังคลอดเล็กน้อย โดยมีลักษณะอาการวิตกกังวลร่วมกับอาการอื่น ซึ่งอาการที่พบได้บ่อยในแม่หลังคลอดที่มีความวิตกกังวล ได้แก่ การไม่มีสมาธิ มีปัญหาด้านการตัดสินใจ มีความรู้สึกเศร้าอยากร้องไห้บ่อยๆ มักจะไม่ค่อยมีปัญหาการนอนหลับและไม่มีความคิดอยากฆ่าตัวตาย จากการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ กฎที่ 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 (จาก Table 14)

ระดับที่ 2 (Level 2): กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นๆ | ไม่พยายามฆ่าตัวตาย (ระดับเฝ้าระวัง)

ในระดับนี้จัดอยู่ในกลุ่มระดับปานกลางและต้องเฝ้าระวัง โดยแม่หลังคลอดจะมีอาการวิตกกังวลเป็นระยะเวลานานและมีอาการอื่นๆ ร่วมด้วย แต่จะมีอาการเด่นชัดเรื่องการไม่มีสมาธิและมีปัญหาในด้านการตัดสินใจ ผู้ป่วยในระดับนี้เมื่อทำการพูดคุยและสอบถามมักจะมีความคิดที่อยากฆ่าตัวตายแต่ไม่ได้ทำ ซึ่งมาจากการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ กฎที่ 1, 6, 9, 18 (จาก Table 14)

ระดับที่ 3 (Level 3): กลุ่มของผู้ที่มีความวิตกกังวล หรือวิตกกังวลร่วมกับปัจจัยอื่นๆ | พยายามฆ่าตัวตาย (กลุ่มเสี่ยง)

กลุ่มนี้ผู้ป่วยจะแสดงอาการวิตกกังวลให้เห็นอย่างชัดเจน อาการที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนระดับอื่นๆ แต่มีความรุนแรงมากขึ้น เช่น แม่หลังคลอดมีอาการวิตกกังวลอย่างเห็นได้ชัด รับประทานอาหารน้อยลง อดนอนเนื่องจากมีปัญหาในการนอน มีปัญหาในการคิดมากคิดซ้ำไปซ้ำมา พูดคุยกับบุคคลในครอบครัวน้อยลงมาก ผู้ป่วยในระดับนี้อาจจะพยายามฆ่าตัวตายมาก่อนแล้ว หรือมีความคิดที่ไม่อยากอยู่บนโลกนี้อยู่ตลอดเวลา ดังแสดงที่กฎความสัมพันธ์ กฎที่ 5 และ 17 (จาก Table 14)

3. การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยวิธีการอื่น (Feature Selection with Other Techniques)

การคัดเลือกคุณลักษณะเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดจำนวนตัวแปรที่ไม่จำเป็นออกจากชุดข้อมูล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการนำตัวแบบไปประยุกต์ใช้ และ

เพิ่มความสามารถในการตีความผลลัพธ์ การวิจัยนี้ใช้วิธีการคัดเลือกคุณลักษณะ 2 วิธี ได้แก่ Wrapper และ Gain Ratio

3.1 การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยวิธีการ Wrapper (Feature Selection with Wrapper Method)

วิธีการ Wrapper เป็นกระบวนการคัดเลือกคุณลักษณะแบบ Model-Based โดยในงานวิจัยได้ทำการคัดเลือกคุณลักษณะร่วมกับวิธีค้นหาแบบ BestFirst โดยใช้ Decision Tree ในการประเมินผลลัพธ์ของแต่ละชุดคุณลักษณะ จากการทดลองพบว่าชุดคุณลักษณะที่ได้รับการคัดเลือกมีทั้งหมด 8 ปัจจัยตามลำดับความสำคัญ ดัง Table 6

Table 6 illustrates the feature selection using the wrapper method

Order	Selected Features from the Wrapper Method
1	Age
2	Feeling sad or Tearful
3	Trouble sleeping at night
4	Problems concentrating or making decision
5	Overeating or loss of appetite
6	Feeling of guilt
7	Rarely speaks to anyone
8	Suicide attempt

Table 6 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ถูกคัดเลือกมาเป็นอันดับแรก คือ Age ด้วยวิธีการของ Wrapper ร่วมกับ BestFirst ในการเพิ่มลำดับของ Feature ในแต่ละรอบ รอบแรกปัจจัย Age เมื่อเพิ่มเข้าไปแล้วทำให้ค่าความถูกต้องของตัวแบบสูงขึ้นมากกว่าฟีเจอร์อื่นจึงถูกเลือกมาก่อนตามแบบ BestFirst ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการนี้ ปัจจัย Age มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างกับภาวะความเสี่ยงที่อาจเพิ่มขึ้นตามอายุ ในส่วนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอารมณ์ ความรู้สึก ได้แก่ ความรู้สึกเศร้า การไม่มีสมาธิ ความรู้สึกผิด ปัจจัยเหล่านี้เป็นลำดับรองลงมาแสดงให้เห็นว่าแต่ละปัจจัยจะมีความสำคัญเมื่อเกิดขึ้นร่วมกับปัจจัยอื่นๆ

3.2 การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยวิธีการ GainRatio (Feature Selection with Gain Ratio Method)

วิธีการ Gain Ratio ร่วมกับวิธีค้นหาแบบ Ranker เป็นกระบวนการเลือกคุณลักษณะแบบ Filter-Based โดยอาศัยการจัดอันดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยต่อปัจจัย

เป้าหมาย Feeling anxious ซึ่งวิธีการนี้จะไม่มีมีการพิจารณา จากความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมาย ซึ่งผลลัพธ์แสดงดัง
ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัย การคัดเลือกคุณลักษณะ Table 7

Table 7 illustrates the feature selection using the Gain Ratio method

Order	Gain Value	Factor
1	0.14609	Feeling of guilt
2	0.05277	Easily tired
3	0.04678	Problems concentrating or making decision
4	0.03979	Suicide attempt
5	0.03239	Rarely speaks to anyone
6	0.01988	Overeating or loss of appetite
7	0.01549	Trouble sleeping at night
8	0.00259	Age
9	0.00221	Feeling sad or Tearful

ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการ Gain Ratio ซึ่งใช้วิธีการ ค้นหาคุณลักษณะที่เหมาะสมแบบ Ranker โดยจะจัดเรียง คุณลักษณะจากมากไปน้อยตามค่าความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมายและจะไม่มีมีการพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง ปัจจัยจากตารางแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญลำดับแรก คือ ปัจจัย Feeling of guilt หรือความรู้สึกลึกซึ้ง ที่มีค่า Gain Ratio เท่ากับ 0.14609 เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมาย Feeling anxious มากที่สุด เมื่อพิจารณาในด้านของ โครงสร้างปัจจัยอาจแสดงถึงความรู้สึกผิดในช่วงหลังคลอด ไม่ว่าจะเป็นความรู้สึกผิดต่อลูกน้อยที่รู้สึกว่าย่ำแย่ไม่ได้ดีพอ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อภาวะความวิตกกังวลของแม่

อภิปรายผล

1. วิธีการหาความสัมพันธ์

งานวิจัยได้ทดลองหาความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง หรือปัจจัยที่เกิดขึ้นบ่อยร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย ในงานวิจัยได้ใช้วิธี Association Rule เป็นวิธีการหลัก ในการได้มาซึ่งกฎความสัมพันธ์ จากนั้นจึงทำการคัดเลือก ปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากที่สุด ส่วนของขั้นตอนหาความสัมพันธ์ไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ใช้เพียงวิธี Apriori ในการทดสอบ เนื่องจากในชุดข้อมูลที่นำมาใช้ทดลอง มีจำนวนไม่มาก 1,503 แถว และจำนวน Attributes มีเพียง 10 Attribute จัดเป็นชุดข้อมูลขนาดเล็กที่ไม่มีความซับซ้อนมาก ในการประมวลผลก็ไม่ได้ใช้เวลานาน

การใช้ วิธี Apriori จึงเหมาะสมสำหรับการ วิเคราะห์ข้อมูล อีกทั้งในงานวิจัยนี้ต้องการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เข้าใจง่ายเพื่อนำไปวิเคราะห์เชิงลึกต่อไป

ในส่วนของการคัดเลือกปัจจัยที่สำคัญมีการเปรียบเทียบใน ส่วนของการคัดเลือกกฎความสัมพันธ์ ในงานวิจัยใช้มีการคัดเลือกปัจจัยด้วยวิธี Value-Based Factor Analysis จากกฎความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธี Apriori เป็นวิธีที่จะพิจารณาไปถึงค่า ข้อมูลของปัจจัยที่เกิดความสัมพันธ์ส่งผลต่อค่าของปัจจัยอื่น การใช้วิธี Apriori ในการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยจึงมีความ สำคัญทั้งในด้านการตีความเชิงข้อมูลโดยพิจารณาถึงค่าข้อมูล ความเป็นไปได้ของกฎความสัมพันธ์ และการพัฒนาแนวทางการเฝ้าระวังกลุ่มเสี่ยง

2. ค่าพารามิเตอร์สำหรับประเมินกฎความสัมพันธ์

ส่วนของการประเมินกฎความสัมพันธ์ ในงาน วิจัยใช้ค่า Support และค่า Confidence ไม่ได้มีการใช้ค่า Lift ในการประเมินผล เนื่องจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันในกฎความสัมพันธ์ที่ได้ ทุกปัจจัยเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดภาวะ ซึมเศร้าของแม่หลังคลอด กฎความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจึงมั่นใจ ได้ว่าเกี่ยวข้องกับอาการของแม่ที่มีภาวะซึมเศร้าหลังคลอด มีความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ กับปัจจัยเป้าหมายอย่างเป็น เหตุเป็นผล อีกทั้งในงานวิจัยจุดประสงค์ของการทดลองในการ หาความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ปัจจัยที่เกิดขึ้นบ่อยและจะนำ ปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับต้นเหล่านั้น นำไปใช้เพื่อประยุกต์ ในการเป็นตัวอย่างของการสร้างแบบคัดกรองอาการซึมเศร้า หลังคลอด

3. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากกฎความสัมพันธ์

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองพบได้ทั้งกฎที่เป็นแบบ Single-Feature และ Multi-Feature จากผลการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์พบว่ากฎที่ได้ส่วนใหญ่เป็นกฎประเภท Single-Feature ซึ่งมีปัจจัยฝั่งต้นเหตุเพียงหนึ่งปัจจัย ตัวอย่างเช่น "Easily tired = Yes ==> Feeling anxious = Yes" มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวบ่งชี้เบื้องต้น โดยเฉพาะในกลุ่มอาการที่แสดงออกชัดเจนในปัจจัยเดียว ส่งผลต่อการสร้างแบบคัดกรองเฉพาะเจาะจงมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์กฎในเชิงลึกพบว่าปัจจัยที่เกิดขึ้นในกฎนั้นไม่มีความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้กับปัจจัยเป้าหมาย และยังเป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นในกฎความสัมพันธ์ที่มีค่าความเชื่อมั่นสูงที่สุด

จากตัวอย่างกฎความสัมพันธ์ "Overeating or loss of appetite=No Feeling of guilt=No ==> Feeling anxious=Yes" โดยมีค่าความเชื่อมั่นของกฎนี้คิดเป็น 95% ซึ่งเป็นค่าสูงสุดจากการทดลอง และเป็นกฎลำดับที่ 1 ที่เกิดความสัมพันธ์ร่วมกับปัจจัยเป้าหมายจะเห็นได้ว่าปัจจัย Overeating or loss of appetite=No และ Feeling of guilt=No เมื่อแปลความหมายตามความสัมพันธ์ของกฎพบว่ากฎความสัมพันธ์นี้ "ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการรับประทานอาหาร" และ "ไม่มีความรู้สึกผิดที่ผิดปกติ" แต่มีแนวโน้มทำให้เกิดความวิตกกังวล หากวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของกฎจะเห็นว่าปัจจัยที่เกิดขึ้นในชุดข้อมูลนี้ไม่มีความเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดความวิตกกังวล

ข้อค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบแบบคัดกรองภาวะโรคซึมเศร้าของแม่หลังคลอด จากผลการทดลองของการคัดเลือกปัจจัยโดยการวิเคราะห์ค่าข้อมูลของปัจจัยร่วมด้วย แสดงให้เห็นว่าจากปัจจัย Overeating or loss of appetite และ Feeling of guilt ที่เกิดความสัมพันธ์กันและถูกสร้างกฎที่มีค่าความเชื่อมั่นสูงที่สุดนั้น เมื่อพิจารณาค่าข้อมูลของปัจจัยและทำการคัดเลือกปัจจัยใหม่ ปัจจัย Overeating or loss of appetite ไม่เกิดความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ร่วมกับปัจจัยเป้าหมาย การสร้างแบบคัดกรองรูปแบบเดิมอาจจะมียปัจจัยอาการของผู้ป่วยโรคซึมเศร้าจำนวนมากแต่เมื่อผ่านการหาความสัมพันธ์ก็จะได้ปัจจัยที่เหมาะสม กระชับและตรงกับเป้าหมายการคัดกรองมากขึ้น

4. การประยุกต์ใช้ปัจจัยในการออกแบบเพื่อสร้างแบบคัดกรอง

ในการนำปัจจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบคัดกรองและแบบประเมินสุขภาพจิต การวิเคราะห์เพื่อเลือกปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้ปัจจัยและค่าข้อมูลจะต้องทำให้กฎความสัมพันธ์นั้นเป็นไปได้ นอกจากนี้จะมีอยู่ 1 ปัจจัยที่เกิดขึ้น

ขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงที่ถึงแม้เมื่อสร้างกฎความสัมพันธ์ปัจจัยจะมีค่าข้อมูลเป็น "Yes หรือ No" ก็จะไม่ตัดปัจจัยนี้ทิ้ง คือ ปัจจัยการพยายามฆ่าตัวตาย (Suicide attempt) ในกรณีของปัจจัย Suicide attempt หากทำการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์โดยคัดเลือกปัจจัยที่เป็น "No" ออกและเลือกเฉพาะกฎที่มีค่าข้อมูลเป็น "Yes" ผลกระทบจากการตัดค่าข้อมูล "No" ของปัจจัย Suicide attempt ออก

การเลือกวิเคราะห์กฎเฉพาะ Suicide attempt = Yes ทำให้มุ่งเน้นเฉพาะผู้ที่อยู่ในกลุ่มเสี่ยงเท่านั้น ขณะที่กลุ่ม "No" อาจยังอยู่ในระยะเสี่ยงต่ำ-กลาง เช่น กฎ "Feeling anxious=Yes Suicide attempt=No ==> Problems concentrating or making decision=Often" ตามความหมายของกฎนี้ถึงแม้ว่า Suicide attempt=No แต่ไม่ได้หมายถึงจะไม่ฆ่าตัวตาย การที่ปัจจัยลักษณะนี้เกิดความสัมพันธ์ขึ้นมา อาจมีความหมายว่า "ผู้ป่วยที่เกิดความวิตกกังวลอาจเคยมีความคิดจะฆ่าตัวตายแต่ตอนนี้ไม่ได้มีความคิดนั้น จะมีแนวโน้มทำให้เกิดปัญหาด้านสมาธิและการตัดสินใจ" ซึ่งกรณีแบบนี้สามารถให้เป็นกรณีเฝ้าระวังและให้คำปรึกษาก่อนจะกลายเป็นขั้นเสี่ยงสูงได้

5. การคัดเลือกคุณลักษณะด้วยหลากหลายวิธีการ

ในงานส่วนของการคัดเลือกปัจจัยหรือคุณลักษณะ นอกจากจะใช้การเลือกปัจจัยด้วยวิธี Value-Based Factor Analysis แล้ว ยังได้มีการทดลองกับวิธีการคัดเลือกคุณลักษณะอื่นๆ ได้แก่ วิธี Wrapper และ Gain Ratio จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ได้จากขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัยของทั้ง 3 วิธี พบว่า วิธี Wrapper ให้การจัดลำดับที่ค่อนข้างแตกต่างจากอีก 2 วิธี โดยปัจจัยสำคัญลำดับ 1 ของวิธี Wrapper คือ ปัจจัย Age ซึ่งปัจจัยนี้ถ้าเทียบกับอีก 2 วิธีถูกคัดเลือกให้อยู่อันดับสุดท้ายและรองสุดท้าย

เนื่องด้วยวิธี Wrapper ซึ่งใช้การประเมินร่วมกับตัวแบบจริงนั้นน่าจะเหมาะสมที่สุดสำหรับนำปัจจัยที่ได้ไปสร้างแบบคัดกรองสุขภาพ แต่เนื่องด้วยชุดข้อมูลในการทดลองนี้ควรมีการคำนึงถึงค่าข้อมูลของแต่ละปัจจัยด้วย วิธี Wrapper ไม่ได้มีการพิจารณาลึกไปถึงส่วนของข้อมูลเชิงลึกจึงอาจจะทำให้ได้ลำดับของคุณลักษณะที่แตกต่างกับอีก 2 วิธี ในขณะที่วิธี Gain Ratio และวิธี Value-Based Factor มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย จึงเหมาะสำหรับการคัดเลือกปัจจัยสำหรับสร้างตัวแบบการคัดกรองเบื้องต้น อีกทั้งวิธี Value-Based Factor มีประสิทธิภาพด้านการค้นพบรูปแบบความสัมพันธ์เชิงลึกในข้อมูล ซึ่งสามารถนำ

มาใช้ร่วมกันเพื่อเสริมความเข้าใจก่อนการออกแบบเพื่อสร้างแบบคัดกรองได้ดี

สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี Apriori ซึ่งมีจุดประสงค์ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมจากกฎความสัมพันธ์ที่ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการคัดกรองภาวะโรคซึมเศร้าของแม่หลังคลอด หรือโรคซึมเศร้าหลังคลอด โดยในการทดสอบได้ใช้ชุดข้อมูลที่เกี่ยวข้องแม่ที่มีภาวะโรคซึมเศร้าหลังคลอดบุตร มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 9 ปัจจัย และมี 1 ปัจจัยเป้าหมาย คือ Feeling anxious ซึ่งเป็นอาการความวิตกกังวล เมื่อมีการจัดเตรียมข้อมูลแล้วในส่วนของการสร้างกฎความสัมพันธ์ด้วยวิธีการ Apriori จะเริ่มจากการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่า Support ที่ 0.2 และค่า Confidence ที่ 0.2 และเข้าสู่ขั้นตอนของการสร้างกฎความสัมพันธ์ กระบวนการนี้จะเริ่มจากการสร้าง Frequent Item ก่อนเพื่อค้นหาปัจจัยที่เกิดขึ้นร่วมกันบ่อยและต้องเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยเป้าหมาย จากนั้นปัจจัยที่ได้จะถูกนำไปสร้างเป็นกฎความสัมพันธ์ จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ขั้นต่ำที่ 0.2 ทำให้ได้กฎความสัมพันธ์ทั้งหมด 76 กฎ เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ได้จากกฎค่าข้อมูลของแต่ละปัจจัยรวมถึงความเป็นไปได้ของกฎความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นและตัดกฎที่เป็นไปไม่ได้ออกไปทำให้เหลือกฎ 18 กฎ

ผลจากการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ทำให้ค้นพบปัจจัยที่มีนัยยะทางคลินิก ซึ่งก็คือกฎที่เกิดความสัมพันธ์กับปัจจัยการฆ่าตัวตาย (Suicide attempt = Yes) ปัจจัยนี้พบได้น้อยมากที่สามารถบ่งบอกว่า “ความวิตกกังวลมีแนวโน้มทำให้เกิดการฆ่าตัวตาย” จากการวิเคราะห์กฎ มีเพียง 2 กฎเท่านั้นจากทั้งหมด 18 กฎ นอกจากนี้การสร้างกฎความสัมพันธ์ทำให้สามารถคัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ในการคัดกรองภาวะโรคซึมเศร้า โดยมีปัจจัย ดังนี้ Problems concentrating or making decision, Suicide attempt, Feeling sad or Tearful ทั้ง 3 ปัจจัยหลักนี้เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความวิตกกังวลมากที่สุดซึ่งจะช่วยลดงานในการประเมินปัจจัยจำนวนมากที่อาจไม่มีความเกี่ยวข้องโดยตรง ทั้ง 3 ปัจจัยมีความครอบคลุมนัยยะสำคัญต่อการคัดกรองผู้ที่มีภาวะซึมเศร้าหลังคลอด โดยครอบคลุมด้านความรู้สึก พฤติกรรม และการทำงานทางปัญญา ซึ่งการมีข้อมูลเบื้องต้นในการคัดกรองภาวะโรคทั้ง 3 ด้านนี้แสดงให้เห็นถึงถึงภาวะความเครียดและความวิตกกังวลในระดับที่ควรได้รับการดูแลและให้คำปรึกษา นอกจากนี้กฎความสัมพันธ์ที่ได้ยังสามารถช่วยแบ่งระดับ

ความรุนแรงของอาการและจำแนกกลุ่มเสี่ยงได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนแนวทางดูแล การให้คำปรึกษา การออกแบบระบบคัดกรองผู้ป่วยเบื้องต้น

งานวิจัยในอนาคต จากที่กฎความสัมพันธ์สามารถแบ่งระดับความรุนแรงของกลุ่มภาวะโรคซึมเศร้าจากปัจจัยที่เกิดขึ้น งานวิจัยในอนาคตอาจพัฒนาเป็นตัวแบบการคัดกรองที่สามารถจำแนกระดับความเสี่ยงของผู้ป่วยได้โดยอัตโนมัติ ด้วยวิธีการเรียนรู้เครื่องจักร เช่น วิธี Random Forest, Stacking Ensemble และ Logistic Regression โดยนำปัจจัยที่ได้ในการทดลองนี้ไปใช้ในการสร้างตัวแบบ

เอกสารอ้างอิง

- Andersson, A., Garcia-Argibay, M., Viktorin, A., Ghirardi, L., Butwicka, A., Skoglund, C., Bang Madsen, K., D'Onofrio, B. M., Lichtenstein, P., Tuvblad, C., & Larsson, H. (2023). Depression and anxiety disorders during the postpartum period in women diagnosed with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Affective Disorders*, 325, 817–823. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.01.069>
- Andrei, A.-M., Webb, R., & Enea, V. (2023). Health anxiety, death anxiety and coronaphobia: Predictors of postpartum depression symptomatology during the COVID-19 pandemic. *Midwifery*, 124, 103747. <https://doi.org/10.1016/j.midw.2023.103747>
- Biilah, A.-M., Raihan, M., Akter, T., Alvi, N., Bristy, N. J., & Rehana, H. (2022). Human depression prediction using association rule mining technique. In *Proceedings of the International Conference on Big Data, IoT, and Machine Learning* (pp. 223–237). https://doi.org/10.1007/978-981-16-2597-8_19
- Delos Arcos, J. R., & Hernandez, A. A. (2019). Efficient apriori algorithm using enhanced transaction reduction approach. *2019 IEEE 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, 97–101. <https://doi.org/10.1109/TSSA48701.2019.8985482>
- Fan, M.-Y., Chi, C., Zhang, J.-H., Wang, R.-X., Kong, Q.-Y., Wang, T.-Y., Yan, J.-L., & Chen, Y.-J. (2023). Acupoints compatibility rules of acupuncture for depression disease based on data mining technology. *Zhongguo Zhen Jiu = Chinese Acupuncture &*

- Moxibustion*, 43(3), 269–276. <https://doi.org/10.13703/j.0255-2930.20221103-k0001>
- Fitzpatrick, S., & Whitfield, K. C. (2025). Maternal postpartum depression and responsive feeding in the first 2 years: A review. *Infant Behavior and Development*, 80, 102073. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2025.102073>
- Gao, J., Wang, Z., Jin, T., Cheng, J., Lei, Z., & Gao, S. (2024). Information gain ratio-based subfeature grouping empowers particle swarm optimization for feature selection. *Knowledge-Based Systems*, 286, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111380>
- Hamdad, L., & Benatchba, K. (2021). Association rules mining. *SN Computer Science*, 2(6), 449. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00819-x>
- Hamtanon, P., Thongnak, N., & Chuntharapat, S. (2022). Maternal experience with postpartum depression during the COVID-19 pandemic. *Journal of MCU Nakhondhat*, 9(12), 1–14.
- Hannon, S., Gartland, D., Higgins, A., Brown, S. J., Carroll, M., Begley, C., & Daly, D. (2023). Physical health and comorbid anxiety and depression across the first year postpartum in Ireland (MAMMI study): A longitudinal population-based study. *Journal of Affective Disorders*, 328, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.02.056>
- Harikumar, S., & Dilipkumar, D. U. (2016). Apriori algorithm for association rule mining in high dimensional data. *2016 International Conference on Data Science and Engineering (ICDSE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICDSE.2016.7823952>
- Høgh, S., Hegaard, H. K., Renault, K. M., Svendsen, M. N., Navne, L. E., & Frokjaer, V. G. (2025). Women's perceptions of biological causes and potentials of genomic risk markers in postpartum depression: A qualitative study. *Sexual & Reproductive Healthcare*, 43, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.srhc.2024.101057>
- Hu, Y., Chen, J., Li, J., & Xu, Z. (2024). Models for depression recognition and efficacy assessment based on clinical and sequencing data. *Heliyon*, 10(14), e33973. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33973>
- Jiayuan, Z., Xiaoxi, L., Dan, C., & Yuqiu, Z. (2025). Network analysis of postpartum depression, sleep problems, psychological birth trauma, and quality of life in women with high-risk pregnancy. *Midwifery*, 148, 104476. <https://doi.org/10.1016/j.midw.2025.104476>
- Kaur, B., Rathi, S., & Agrawal, R. K. (2022). Enhanced depression detection from speech using quantum whale optimization algorithm for feature selection. *Computers in Biology and Medicine*, 150, 106122. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.106122>
- Kawajiri, M., Saito, F., Takeishi, Y., Mori, H., Chiba, K., Odaira, T., Saito, M., & Yoshida, M. (2025). Does the 2-week postpartum health checkup for term deliveries prevent postpartum depression? Analysis using a 10-year database from a university hospital in Japan. *Journal of Affective Disorders*, 388, 119459. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.119459>
- Krzeczkowski, J. E., Kousha, K. Y., Savoy, C., Schmidt, L. A., & van Lieshout, R. J. (2025). Adaptive changes in infant emotion regulation persist three months following birthing parent receipt of cognitive behavioral therapy for postpartum depression. *Journal of Affective Disorders*, 381, 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.03.148>
- Nasim, S., Al-Shamayleh, A. S., Thalji, N., Raza, A., Abualigah, L., Alzahrani, A. L., Alwadain, A., Alosekait, D. M., Migdady, H., & Abd Elminaam, D. S. (2024). Novel meta learning approach for detecting postpartum depression disorder using questionnaire data. *IEEE Access*, 12, 101247–101259. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3427685>
- Priya S., K., & Karthika K., P. (2023). An embedded feature selection approach for depression classification using short text sequences. *Applied Soft Computing*, 147, 110828.
- Rabinowitz, E. P., Kutash, L. A., Richeson, A. L., Sayer, M. A., Samii, M. R., & Delahanty, D. L. (2023). Depression, anxiety, and stress in pregnancy and postpartum: A longitudinal study during the COVID-19 pandemic. *Midwifery*, 121, 103655. <https://doi.org/10.1016/j.midw.2023.103655>

- Rojarath, A., Jantama, T., Srirat, W., Mookpakdee, N., Khumwiso, K., & Surinta, O. (2024). Factors analysis affecting stroke disease revealed using association rules. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 43(3), 206–222. <https://lii01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/258947/178655>
- Rojarath, A., Songpan, W., Okafor, E., & Surinta, O. (2025). Enhancing personality characteristic analysis with SMOTE and association rule mining: A case study on introverts and extroverts. *ICIC Express Letters*, 19(6), 597–606. <https://doi.org/10.24507/icicel.19.06.597>
- Shin, D., & Hur, J. (2019). Predictive modeling of postpartum depression using machine learning approaches (P18-130-19). *Current Developments in Nutrition*, 3(Suppl 1), P18-130–19. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzz039.P18-130-19>
- Song, X., Cheng, X., Li, Y., Guo, R., Liang, Z., Wang, S., & Zhang, H. (2025). Comparative study on filter and wrapper methods for selecting ground motion intensity measures in machine learning-based seismic damage assessment of urban reinforced concrete frame structures. *Journal of Building Engineering*, 106, 112515. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112515>
- Stewart, D. E., & Vigod, S. (2016). Postpartum depression. *New England Journal of Medicine*, 375(22), 2177–2186. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1607649>
- Suebanun, S., Tachasuksri, T., & Chuahorm, U. (2024). Factors predicting postpartum depression among first – time mothers. *Nursing Journal of The Ministry of Public Health*, 34(3), 68–81.
- Tianyi, F.-L., Li, Y., Alderdice, F., Quigley, M. A., Kurinczuk, J. J., Bankhead, C., & Carson, C. (2022). The association between conception history and subsequent postpartum depression and/or anxiety: Evidence from the Clinical Practice Research Datalink 1991–2013. *Journal of Affective Disorders*, 310, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.04.138>
- van der Hoeven, L., Hofman, A., Rösler, L., van der Werf, Y. D., & Broekman, B. F. P. (2025). Antepartum insomnia symptoms and its association with postpartum depression symptoms in women with and without psychiatric vulnerability: A prospective cohort study. *Journal of Affective Disorders*, 374, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.01.030>
- Zhang, Y., Wang, S., Hermann, A., Joly, R., & Pathak, J. (2021). Development and validation of a machine learning algorithm for predicting the risk of postpartum depression among pregnant women. *Journal of Affective Disorders*, 279, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2020.09.113>
- Zhao, L., Hao, F., Xu, T., & Dong, X. (2017). Positive and negative association rules mining for mental health analysis of college students. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(8), 4605–4612. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.01011a>

การเพิ่มสมรรถนะการทำนายเสถียรภาพและระยะวิบัติของลาดดินโดยใช้การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์และคุณสมบัติพหุนาม

Enhanced prediction of slope stability and failure distance using hyperparameter tuning and polynomial features

พัฒนศักดิ์ ชัยพรรณนา¹, พรเกษม จงประดิษฐ์², จิรวัดน์ ศุภโกศล¹, ปิโยรส ทะเสนหอด¹, รัชชศิริ สุขรักษ์³ และ นัฐวุฒิ เหมะรุฉิน^{1*}

Pattanasak Chaipanna¹, Pornkasem Jongpradist², Jirawat Supakosol¹, Piyoros Tasenhod¹, Raksiri Sukkarak³ and Nattawut Hemathulin^{1*}

Received: 5 July 2024 ; Revised: 15 October 2024 ; Accepted: 21 January 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (ML) ต่างๆ โดยเน้นที่ความสำคัญของการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์และคุณสมบัติ การทำนายค่าความปลอดภัย (FS) ระยะทางการพังทลายของลาดดินเมื่อเทียบกับความสูงของลาดดิน และระดับความปลอดภัยของลาดดิน พารามิเตอร์นำเข้า ได้แก่ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (C), มุมเสียดทานภายใน (Phi), มุมลาดชัน (Slope) และความสูงของลาดดิน (H) ประสิทธิภาพของแต่ละโมเดลถูกประเมินโดยใช้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เป็นเปอร์เซ็นต์ (MAPE), ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE), และค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง (R^2) สำหรับการทำนายแบบถดถอย ในขณะที่งานการจำแนกประเภทถูกประเมินโดยใช้ค่าความแม่นยำ (Accuracy), ความถูกต้อง (Precision), การระลึก (Recall), คะแนน F1 (F1-score) และพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (AUC) การวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง ML ที่แตกต่างกัน แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพทั้งในการทำนายถดถอยและจำแนกคือป่าสุ่ม การใช้คุณสมบัติแบบพหุนามเพิ่มประสิทธิภาพให้วิธีเชิงเส้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์เพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์และโครงข่ายประสาทเทียมที่มีหลายชั้นได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน, การเรียนรู้ของเครื่อง, ระยะวิบัติของลาดดิน

Abstract

This study presents an extensive analysis of slope stability using various machine learning (ML) models, focusing on hyperparameter tuning and feature importance and model validation for predicting factor safety (FS), slope failure distance relative to the height of the slope, and the safety level of the slope. The input parameters include cohesion (C), internal friction angle (Phi), slope angle (Slope), and height of the slope (H). The performance of each model was assessed using Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Squared Error (MSE), and R-squared (R^2) for regression tasks, while classification tasks were evaluated using accuracy, precision, recall, F1-score, and Area Under the Curve (AUC). The analysis demonstrates the efficacy of different ML models. The model that performed well in

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹ Division of Civil Engineering, Faculty of Industrial and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

³ Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, e-mail: nattawut.he@rmuti.ac.th

both regression and classification is the Random Forest. The use of polynomial features significantly improved the performance of linear methods, while hyperparameter tuning greatly enhanced the performance of Support Vector and MLP models.

Keywords: Slope stability analysis, machine learning, slope failure distance

บทนำ

การขาดเสถียรภาพของลาดดินเป็นปัญหาสำคัญสำหรับวิศวกรธรณีเทคนิค การวิบัติลาดดินสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดลอมและโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น รวมถึงสูญเสียชีวิตและบาดเจ็บ จากรายงานขององค์การอนามัยโลก ตั้งแต่ปี 1998-2017 ดินถล่มส่งผลกระทบต่อประชากร 4.8 พันล้านคน และทำให้เสียชีวิต 18,000 คน (World Health Organization, 2023) นอกจากนี้การวิบัติลาดดินยังส่งผลให้บ้านเรือน อาคาร และโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ เสียหาย การสัญจรและสาธารณูปโภคได้รับผลกระทบ นำไปสู่ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและสร้างใหม่ รวมถึงค่าใช้จ่ายทางกฎหมายและประกัน ทำให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ธนาคารโลก ประเมินว่าดินถล่มก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจประมาณ 6 พันล้านดอลลาร์ต่อปี (World Bank, 2020) การวิบัติลาดดินยังทำให้ดินและหินเคลื่อนที่ เปลี่ยนแปลงสภาพภูมิประเทศ ดินไม่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก สูญเสียพืชพรรณ และเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำหรือทำให้เกิดน้ำท่วม การวิเคราะห์เสถียรภาพและระยะวิบัติลาดดินมีความสำคัญในการประเมินความปลอดภัย ช่วยระบุความเสี่ยงจากดินถล่มและลดความเสียหายต่อชีวิตและโครงสร้าง วิศวกรใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินในการออกแบบและวางแผนโครงสร้างพื้นฐานเพื่อลดความเสี่ยง ซึ่งอาจรวมถึงการเสริมเสถียรภาพ การปรับปรุงระบบระบายน้ำ หรือการใช้มาตรการทางวิศวกรรมอื่นๆ การวิเคราะห์ระยะวิบัติลาดดินยังช่วยทำความเข้าใจขอบเขตและขนาดของการทรุดตัวของดิน ซึ่งมีความสำคัญในการประเมินความเสี่ยงและออกแบบมาตรการบรรเทาความเสี่ยง

วิธีการแบบดั้งเดิมในการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินมักใช้หลักการสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method, LEM) เช่น วิธีของ Bishop (1955), Fellenius (1927), Morgenstern and Price (1965) และ Spencer (1967) วิธีเหล่านี้ถูกใช้งานมาเป็นเวลานานและมีบทบาทสำคัญในวิศวกรรมธรณีเทคนิค การประเมินเสถียรภาพของลาดดินจะพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) โดยเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนกับแรงขับ อีกวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ซึ่งพัฒนาขึ้น

ตามความก้าวหน้าของคอมพิวเตอร์ วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ลาดดินที่มีรูปทรงซับซ้อนและคุณสมบัติของดินที่แตกต่างกันได้ และสามารถวิเคราะห์การให้แรงแบบไดนามิกได้ วิธีเชิงตัวเลขแบ่งเป็นสองแบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง เช่น วิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method, FDM), วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM), และวิธีเบาดาร์เอลิเมนต์ (Boundary Element Method, BEM) และการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น การวิเคราะห์เคลื่อนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Deformation Analysis, DDA) และการวิเคราะห์แบบเม็ดดิน (Bonded Particle Model, BPM) ข้อจำกัดของวิธีเชิงตัวเลขคือต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงและซอฟต์แวร์เฉพาะทาง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการสร้างแบบจำลองและควบคุมการวิเคราะห์ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) โดยเฉพาะเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning, ML) ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ (ณัฐวุฒิ แถมเงิน และคณะ, 2023) ด้านการพยากรณ์ปริมาณการส่งออก (สุภาวิณี ชันคำ และ สิโรรัตน์ จันทงาม, 2023) เนื่องจากสามารถทำนายเสถียรภาพลาดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Azarafa *et al.*, 2021; Nikoobakht *et al.*, 2022; Pham *et al.*, 2022) และแม่นยำกว่าวิธีที่ผ่านมา (Wang *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2021) หลายอัลกอริทึม ML เช่น k-NN, OPFK-NN, และ LSTM (Huang *et al.*, 2023) ได้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นและความสามารถในการค้นพบรูปแบบที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลเสถียรภาพลาดดิน แบบจำลองเหล่านี้ไม่เพียงเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย แต่ยังให้ข้อมูลที่มีคุณค่าเกี่ยวกับความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับการทำนาย ซึ่งช่วยในการตัดสินใจในการประเมินเสถียรภาพลาดดิน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำนายเสถียรภาพและระยะวิบัติของลาดดินโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง
2. เพื่อเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องด้วยการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์และการใช้คุณสมบัติพหุนาม

ขั้นตอนการวิจัย

1. การสร้างข้อมูล

สำหรับขั้นตอนการทำนายโดยใช้แบบจำลองข้อมูลที่น่าเข้ากระบวนการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี LEM ที่กำหนดให้เป็นดินชั้นเดียวมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกตำแหน่งและทุกทิศทาง หน่วยน้ำหนักดินคงที่เท่า 18 kN/m^3 โดยไม่พิจารณาถึงความชื้นและน้ำในดิน ตัวแปรต้นที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle, Phi) มุมลาดชันของลาดดิน (Slope) และความสูงของลาดดิน (H) (Figure 1) ตัวแปรเป้าหมายที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามสมมติฐานของ Janbu อัตราส่วนระหว่างระยะวิกฤตต่อความสูงของลาดดิน (L/H) และสุดท้ายคือระดับความเสถียรของลาดดินแบ่งเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับไม่ปลอดภัย (Fail) ระดับวิกฤติ (Critical) ระดับปลอดภัย (Safe) แบ่งตามค่าอัตราส่วนความปลอดภัย น้อยกว่า 1.0, 1.0-1.5 และมากกว่า 1.5 ตามลำดับ (Harabinová & Panulinová, 2020; WSDOT, 2013) ทั้งหมด 627 ชุดข้อมูล

2. การประมวลผลข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory Data Analysis, EDA)

ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นคือขั้นตอนสำคัญในเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เป็นขั้นตอนตรวจสอบข้อมูลที่สูญหาย ตรวจสอบการซ้ำกันของข้อมูล ช่วยให้เข้าใจถึงชุดข้อมูลไม่ว่าจะเป็น ขนาด โครงสร้าง และชนิดของตัวแปร ช่วยตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล ช่วยในการจัดกลุ่มและแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลแต่ละกลุ่ม

การตรวจจับข้อมูลผิดปกติ Outlier Detection Techniques

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธี Interquartile Range (IQR) ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ ใช้ในการตรวจจับข้อมูลที่ไม่เป็น Normal Distribution หรือมีการกระจายตัวไม่เป็นแบบปกติ โดยที่ IQR คือความแตกต่างระหว่างควอไทล์ที่สามและควอไทล์ที่หนึ่ง ($Q3 - Q1$) โดยที่ $Q1$ คือควอไทล์ที่ 25% และ $Q3$ คือ ควอไทล์ที่ 75% ของข้อมูล จากนั้นคำนวณเส้นขอบบน (Upper Bound) และเส้นขอบล่าง (Lower Bound) โดยใช้สูตร $Upper Bound = Q3 + 1.5 * IQR$ และ $Lower Bound = Q1 - 1.5 * IQR$ ข้อมูลที่มีค่า FS ต่ำกว่า Lower Bound หรือสูงกว่า Upper Bound ถือว่าเป็นค่าผิดปกติ (Outliers) และถูกตัดออก

ข้อมูลที่ถูกจัดการเบื้องต้นเหลือจำนวน 588 ชุดข้อมูลแสดงใน Table 1 ที่แสดงถึงจำนวนข้อมูล (Count) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std) ค่าต่ำสุด (Min)

ค่าควอไทล์ที่ 25%, 50% และ 75% และค่าสูงสุดของตัวแปร (Max) จากตารางจะเห็นได้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งของ C และ FS ต่างก็มากกว่าค่าเฉลี่ยแสดงว่ามีการกระจายข้อมูลที่กว้าง Figure 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และแผนภาพการกระจายของข้อมูลแต่ละคู่ การกระจายตัวของข้อมูลสี่เหลี่ยม สีน้ำเงิน และสีแดง แสดงถึงความปลอดภัยของลาดดินในระดับ Fail, Critical และ Safe ตามลำดับ ส่วนด้านซ้ายล่างของภาพแสดงการกระจายตัวของข้อมูล มีเส้นสีแดง, น้ำเงิน, เขียวและดำแสดงแนวโน้มสำหรับจำแนกระดับความปลอดภัยของลาดดินระดับต่างและแนวโน้ม ตามลำดับ

FS: มีค่าสหสัมพันธ์กับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (0.78) และมุมเสียดทานภายใน (0.13) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น อัตราส่วนความปลอดภัยจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน มีความสัมพันธ์ลบกับความลาดชัน (-0.049) และความสูง (-0.21) ซึ่งหมายความว่าเมื่อมุมลาดชันและความสูงเพิ่มขึ้นอัตราส่วนความปลอดภัยจะลดลงจากการกระจายความหนาแน่นของข้อมูลแถวแนวตั้งของ C จะพบว่า เส้นสีแดงค่าไม่เกิน 10 kN/m^2 แสดงว่าความปลอดภัยในระดับ Fail เกิดขึ้นในกรณีที่ C ต่ำมีค่าไม่ถึง

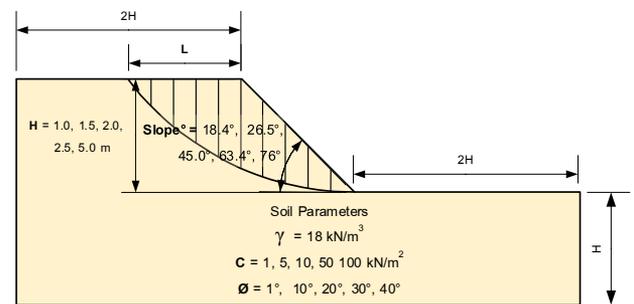


Figure 1 Soil slope model for stability analysis

Table 1 Summary statistics of all input and output variables

Item	C	Phi	Slope	H	FS	L/H
Count	588	588	588	588	588	588
Mean	29.47	20.35	45.42	2.440	5.807	2.919
Std	35.08	14.01	21.25	1.410	5.954	1.448
Min	1.000	1.000	18.43	1.000	0.083	0.500
25%	5.000	10.00	26.50	1.500	1.522	1.667
50%	10.00	20.00	45.00	2.000	3.290	2.776
75%	50.00	30.00	63.43	2.500	8.509	3.800
Max	100.0	40.00	75.96	5.000	23.69	7.000

10 kN/m^2 สอดคล้องกับการกระจายตัวของระดับความปลอดภัยเทียบกับตัวแปรต้น ใน Figure 3 พบว่า

จุดสีแดงอยู่ห่างจากตัวแปร C และ Phi หมายถึง ระดับความปลอดภัย Fail เกิดขึ้นใน C และ Phi ที่ต่ำ และ Slope และ H ที่สูง และระดับความปลอดภัย Safe อยู่ใกล้ C และ Phi สูง และ Slope และ H ที่ต่ำ ส่วนระดับ Critical อยู่ระหว่างข้อมูลทั้งสองก่อนมาทาง Slope

การกระจายความหนาแน่นของตัวแปรในรูปแบบไวโอลินแสดงใน Figure 4 ซึ่งแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด นอกจากนี้ควอไทล์ที่หนึ่ง, ควอไทล์ที่สองและควอไทล์ที่สามแสดงเป็นเส้นขีดด้านล่างและตรงกลางและด้านบนตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า ระดับความปลอดภัย Fail กระจุกตัวที่ค่า C และ Phi ต่ำ มีแนวโน้มที่จะเกิดในค่า Slope ที่สูงมากกว่า และมีโอกาสเกิดขึ้นทุกระดับความสูง (H) ส่วนความปลอดภัยระดับ Critical ปรากฏ C ระดับต่ำ ที่ Phi ก่อนข้างต่ำ ที่ Slope ก่อนข้างสูงแต่มีอัตราส่วนความหนาแน่นข้อมูลน้อยกว่าความปลอดภัยระดับ Fail

3. แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (ML)

การศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ลาดดินโดยใช้ 14 แบบจำลองถดถอย ได้แก่ Linear Regression (LR), Ridge (Ridge), Lasso (Lasso), Elastic Net (EN), KNeighbor Regressor (KNR), Support Vector Regressor (SVR), Decision Tree Regressor (DTR), Extra Tree Regressor (XTR), Random Forest Regressor (RFR), Bagging Regressor (BR), Gradient Boosting Regressor (GBR), AdaBoost Regressor (ABR), CatBoost Regressor ((CBBR) และ MLP Regressor (MLPR) และแบบจำลองการจำแนกอีก 12 แบบจำลอง ได้แก่ Logistic Regression (LgR), KNeighbors Classifier (KNC), Support Vector Classification (SVC), Decision Tree Classifier (DTC), Extra Tree Classifier (XTC), Random Forest Classifier (RFC), Bagging Classifier (BC), Gradient Boosting Classifier (GBC), AdaBoost Classifier (ABC), CatBoost Classifier (CBC), Label Spreading (LS), และ MLP Classifier (MLPC).

4. การแบ่งชุดข้อมูล

การกำหนดจำนวนข้อมูลฝึกสอนในงานวิจัยนี้ใช้ไลบรารี Learning Curve Display ใน scikit-learn และ matplotlib โดยแบ่งตามกลุ่มโมเดลดังนี้: กลุ่ม Linear Models (LR, Ridge, Lasso, EN) 284 ชุด, KNR 470 ชุด, SVR 470 ชุด, กลุ่ม Trees Models (DTR, ETR) 397 ชุด, กลุ่ม Ensemble Models (RFR, BR, GBR, ABR, CBR) 383 ชุด และ MLPR 443 ชุด ค่าเฉลี่ยข้อมูลฝึกสอนในทุกกลุ่มเท่ากับ 408 ชุด และข้อมูลทดสอบ 150 ชุด ทั้งนี้ ไม่ได้นำการหาค่าเหมาะสมจากแบบจำลองการจำแนกมาใช้ เนื่องจากพบความผันผวนอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละจำนวนข้อมูลการสอนของแต่ละแบบจำลอง

5. การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลอง ML

การสร้างข้อมูลคุณสมบัติพหุนาม (Polynomial Feature)

เทคนิคการสร้างตัวแปรต้นเป็นพหุนามเป็นการประมวลผลเบื้องต้น (Preprocessing) ใน ML โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการถดถอยพหุนาม เพื่อสร้างคุณสมบัติพหุนามจากคุณสมบัติดั้งเดิมของชุดข้อมูล ในการวิจัยนี้ ได้กำหนดระดับของคุณสมบัติพหุนาม (Polynomial Feature Degree) ที่ระดับ 2 อย่างชัดเจน ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลอินพุตถูกแปลงให้มีมิติสูงขึ้น โดยการเพิ่มชุดค่าผสมพหุนามของตัวแปรต้นในลักษณะดังนี้: $[1, x_1, x_2, x_1^2, x_1x_2, x_2^2]$

ขั้นตอนการประมวลผลเบื้องต้นนี้มีประโยชน์เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรเป้าหมายไม่ได้เป็นเชิงเส้น ด้วยการเพิ่มคุณสมบัติพหุนาม แบบจำลอง ML สามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมากขึ้นระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรเป้าหมาย ซึ่งอาจปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองได้

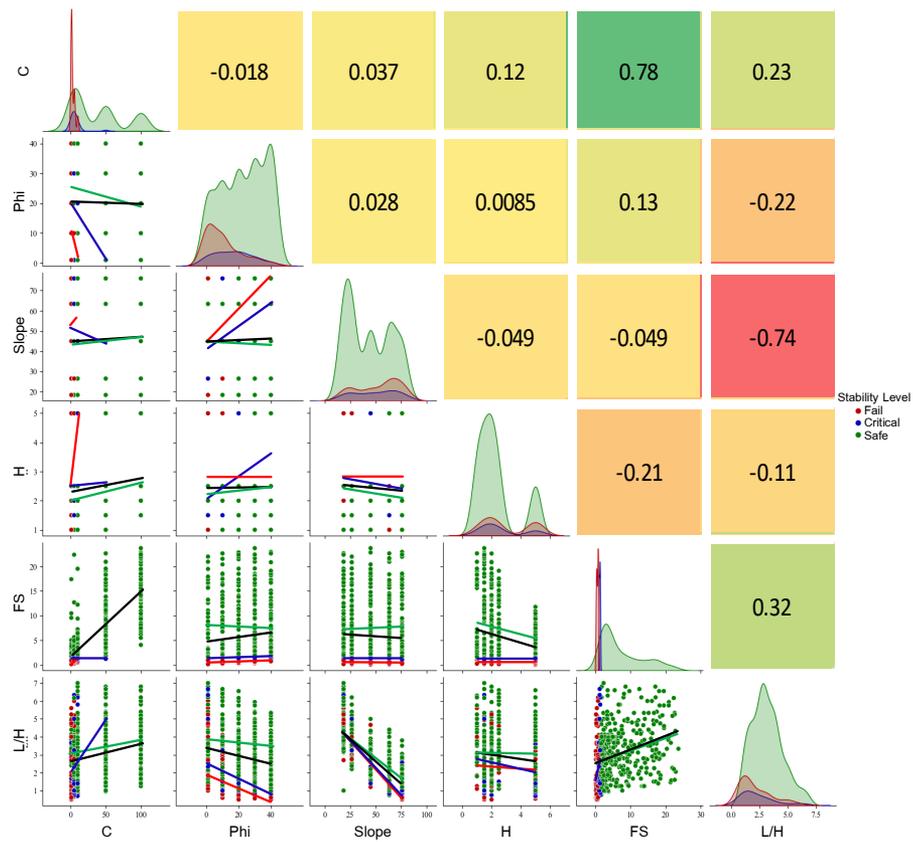


Figure 2 Distribution and correlation of influencing variables in the dataset

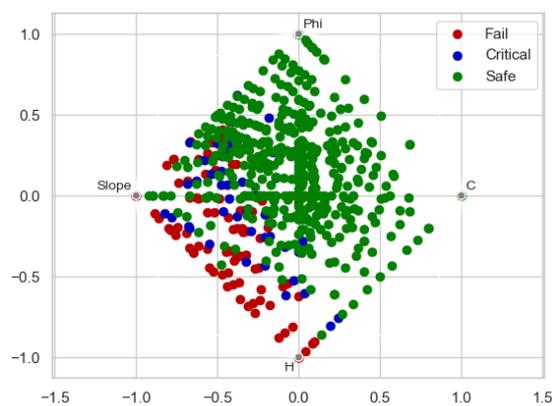


Figure 3 Distribution of radial data

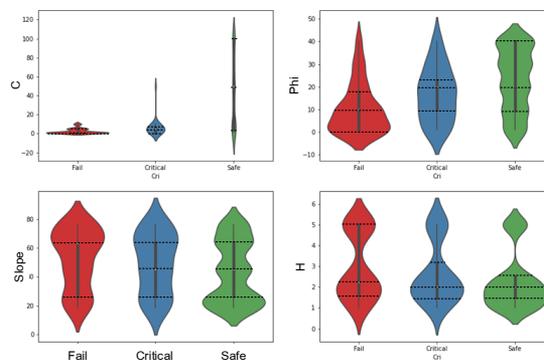


Figure 4 Violin plots showing the distribution of stability level

การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameter Tuning)

การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameter Tuning) เป็นกระบวนการสำคัญในวิทยาการข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองที่กำลังพัฒนา ไฮเปอร์พารามิเตอร์เป็นค่าที่ต้องกำหนดก่อนการฝึกอบรมแบบจำลองและไม่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลได้ เช่น ค่า learning rate สำหรับการเรียนรู้แบบปรับปรุงพารามิเตอร์, จำนวนชั้นในโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network), หรือค่าปรับ (Regularization) ในการจำแนกด้วย SVM

การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างมาก เนื่องจากช่วยให้แบบจำลองสามารถจับความสัมพันธ์ในข้อมูลได้ดีขึ้น วิธีการ

ปรับแต่งที่นิยมใช้มีหลายแบบ เช่น Grid Search ซึ่งเป็น การทดสอบค่าทุกค่าในกรอบที่กำหนด, Random Search ซึ่งเป็น การสุ่มค่าในกรอบที่กำหนด และ Bayesian Optimization ซึ่งใช้วิธีทางสถิติเพื่อทำนายค่าที่ดีที่สุด

นอกจากนี้ การตรวจสอบความถูกต้องข้ามกลุ่ม (Cross-Validation) มักถูกใช้ร่วมกับการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์เพื่อประเมินผลการปรับแต่งอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งข้อมูลเป็นหลายกลุ่มและใช้กลุ่มเหล่านั้นในการทดสอบและฝึกอบรมหลายรอบ เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองไม่ได้เหมาะสมกับข้อมูลเพียงชุดเดียว การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาและทรัพยากร แต่เป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง ค่าปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์แบบ Grid Search ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงใน Table 2

Table 2 The hyperparameters utilized by implemented predictive models

Model	Hyperparameters [Default]	Values Used	Best for		
			Regression		Classification
			FS	L/H	Criterion
Ridge	alpha [1.0]	1e-06, 1e-05, 1e-04, 0.001, 0.01, 0.1, 1	1e-06	1e-06	
Lasso	alpha [1.0]	1e-06, 1e-05, 1e-04, 0.001, 0.01, 0.1, 1	1e-06	1e-06	
EN	Alpha [1.0]	1e-06, 1e-05, 1e-04, 0.001, 0.01, 0.1, 1	1e-06	1e-06	
	l1_ratio [0.5]	np.linspace (0, 1, 5)	0.0	0.0	
LgR	C [1.0]	0.5, 1, 5			0.5
	max_iter [100]	np.arange (50, 1000, 50)			50
KNR	metric ['minkowski']	'euclidean', 'manhattan', 'minkowski'	'euclidean'	'euclidean'	
	n_neighbors [5]	1, 2, 3, 5, 7	1	1	
	weights ['uniform']	'uniform', 'distance'	'uniform'	'uniform'	
KNC	n_neighbors [5]	range (1, 21)			6
	Weights ['uniform']	'uniform', 'distance'			'distance'
	P [2]	1, 2			1
SVR	Kernel ['rbf']	'linear', 'poly', 'rbf'	'linear'	'linear'	
	C [1.0]	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100	0.001	0.0001	
	Epsilon [0.1]	0.00001, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1	1e-06	1e-06	
SVC	C [1.0]	0.01, 0.1, 1, 10, 100			100
	gamma ['scale']	0.01, 0.1, 1, 10			0.01
DTR	criterion ['squared_error']	'squared_error', 'friedman_mse', 'absolute_error', 'poisson'	'squared_error'	'squared_error'	
	min_samples_split [2]	2, 4, 8	2	2	
DTC	max_depth ['None']	3, 5, 7, 9, 'None'			7
	min_samples_split [2]	2, 5, 10			5
	min_samples_leaf [1]	1, 3, 5			3
XTR	n_estimators [100]	np.arange(10,100,5)	50	50	
	min_samples_split [2]	2, 4, 8	2	2	

Table 2 The hyperparameters utilized by implemented predictive models (continue)

Model	Hyperparameters [Default]	Values Used	Best for		
			Regression		Classification
			FS	L/H	Criterion
XTC	max_depth ['None']	3, 5, 7, 9, 'None'			9
	min_samples_split [2]	2, 5, 10			10
RFR	n_estimators [100]	50, 100, 200, 300	50	50	
	min_samples_split [2]	2, 4, 8	2	2	
RFC	n_estimators [100]	100, 200, 300			300
	max_depth ['None']	3, 5, 7, 9, 'None'			9
	max_features ['sqrt']	'sqrt', 'log2'			'log2'
BR,	n_estimators [10]	5, 10, 50, 100, 500, 1000	5	5	50
BC	max_samples [1.0]	np.arange(0.4, 0.8, 0.05)	0.5	0.5	0.7
GBR,	n_estimators [100]	50, 100, 200, 300	50	50	50
GBC	learning_rate [0.1]	0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1	0.01	0.01	1
	min_samples_split [2]	2, 4, 8,	2	2	3
ABR,	n_estimators [50]	25, 50, 100, 200	25	25	100
ABC	learning_rate [1.0]	0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0	0.1	0.01	0.1
CBR	Depth [6]	2, 3, 5, 8	2	2	
CBC	learning_rate [0.3]	0.0001, 0.001, 0.01, 0.05, 0.1	0.0001	0.00001	0.05
	Iterations [1000]	500, 1000, 1500, 2000	500	500	500
LS	Kernel ['rbf']	'rbf', 'knn'			'knn'
	Alpha [0.2]	1.e-03, 1.e-02, 1.e-01, 1.e+00, 1.e+01, 1.e+02			0.001
	max_iter [30]	50, 100, 200			50
MLPR,	hidden_layer_sizes [100]	(300,200,100), (270,180,90), (240,160,80), (300,200,100)	(300,	(240,160,80)	
MLPC		(210, 140, 70)	200,100)		
	Activation ['relu']	'identity', 'logistic', 'tanh', 'relu'	'identity'	'identity'	'logistic'
	max_iter [200]	100, 200, 400, 600, 1000	100	100	1000

6. การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองการประเมินสิทธิภาพแบบจำลองถดถอย

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์โดยเทียบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็นร้อยละของค่าที่ทำนายเทียบกับค่าจริง หาก $MAPE \leq 10\%$ ถือว่าแม่นยำสูง, 10%-20% แม่นยำใช้ได้, 20%-50% แม่นยำพอใช้ และ >50% ไม่แม่นยำ

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Square Error, MSE) วัดค่าเฉลี่ยของความแตกต่างยกกำลังสองระหว่างค่าทำนายและค่าจริง MSE ที่ต่ำหมายถึงแบบจำลองมีความแม่นยำสูง

ค่าความผันแปรตอบสนอง (R^2) วัดความสอดคล้องระหว่างค่าทำนายและค่าจริง โดยค่า R-squared ใกล้ 1 หมายถึงแบบจำลองอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดี

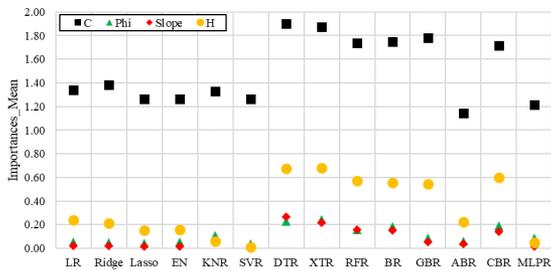
การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองแบบจำแนก

Confusion Matrix เป็นเครื่องมือประเมินประสิทธิภาพการจำแนกประเภท โดยมีองค์ประกอบ 4 ส่วนคือ TP, FP, TN, FN ใช้วัดค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-score กำหนดโดยค่าที่สูงกว่า 0.8 คือความสามารถของแบบจำลองในการจำแนกความปลอดภัยของลาดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

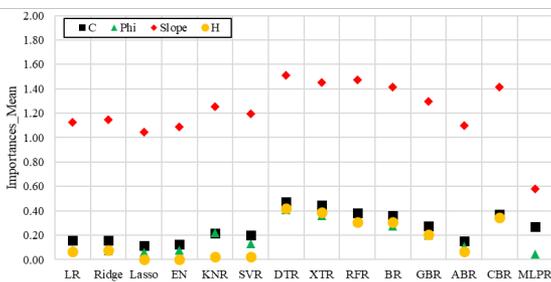
เส้นโค้ง ROC และพื้นที่ใต้กราฟ AUC ใช้ประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองแบบจำแนก Hosmer Jr *et al.* (2013) เสนอได้จำแนกระดับประสิทธิภาพของ AUC คือ $AUC > 0.9$ ถือว่ายอดเยี่ยม (Excellent) อยู่ระหว่าง 0.8-0.9 ถือดีมาก (Very Good), อยู่ระหว่าง 0.7-0.8 ถือดี (Good), อยู่ระหว่าง 0.6-0.7 ถือว่าพอใช้ (Fair), อยู่ระหว่าง 0.5-0.6 ถือว่าแย่มาก (Poor), และต่ำกว่า 0.5 ถือว่าแย่มาก (Fail)

ผลการวิจัย

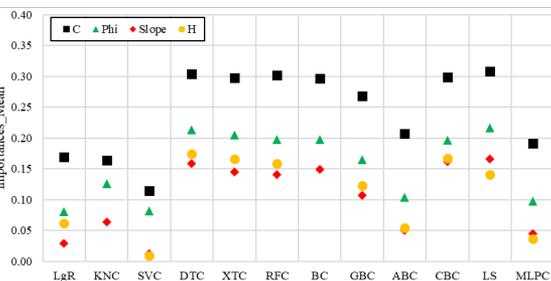
การวิเคราะห์ค่าความสำคัญของตัวแปรสำหรับการทำนายถดถอยอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (C) มีความสำคัญสูงสุด รองลงมาคือความสูงของลาดดิน (H) ดังแสดงใน Figure 5(a) สำหรับการทำนายถดถอยระยะวิบัติต่อความสูงของลาดดิน (L/H) ตัวแปรที่มีความสำคัญสูงสุดคือมุมลาดเอียง (Slope) รองลงมาคือหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (C) โดยในบางแบบจำลองเช่น Lasso และ Elastic Net (EN) ความสูงของลาดดินมีค่าความสำคัญเป็นศูนย์หรือค่าติดลบในกรณีของแบบจำลอง MLP Regressor (MLPR) ดังแสดงใน Figure 5(b) และใน Figure 5(c) ในการทำนายแบบจำแนกระดับความปลอดภัยตัวแปรที่มีความสำคัญสูงสุดคือหน่วยแรงยึดเหนี่ยว (C) เช่นเดียวกับ Figure 5(a) ส่วนตัวแปรที่สำคัญรองลงมาคือมุมเสียดทานภายใน (Phi)



(a) factor of safety regression prediction



(b) failure distance regression prediction



(c) classified prediction of safety level

Figure 5 The importance of variables in each model

Table 3 และ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความเสถียรภาพและระยะวิบัติต่อความสูงของลาดดินตามลำดับโดยใช้แบบจำลอง ML ต่างๆ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองเหล่านี้จากค่า Mean Squared Error (MSE), R-squared (R^2) สำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ โดยทดสอบแบบจำลองแต่ละตัวภายใต้สามกรณี ได้แก่ การใช้คุณสมบัติปกติ คุณสมบัติแบบพหุนาม และการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ ในการเปรียบเทียบจะเปรียบเทียบในข้อมูลหลักเดียวกันซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพสูง ในขณะที่ข้อสังเกตบ่งบอกถึงประสิทธิภาพต่ำวิธีเชิงเส้น LR, Ridge, Lasso และ EN แสดงค่า MAPE และ MSE ในระดับปานกลาง และมีค่า R^2 สูงทั้งสำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองเหล่านี้ยังเป็นฐานที่เชื่อถือได้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีคุณสมบัติแบบพหุนามมีค่าความคลาดเคลื่อน (MAPE และ MSE) ลดลง และค่า R^2 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ชี้ว่าคุณสมบัติแบบพหุนามช่วยให้วิธีการเชิงเส้นจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นของการวิบัติลาดดินได้ แต่ด้วย Ridge, Lasso และ EN มีการทำให้เป็นปกติ (Regularization) ที่ป้องกันไม่ให้เกิดโอเวอร์ฟิตตั้งรวมทั้งลดสัมประสิทธิ์ในการคำนวณถดถอยสำหรับตัวแปรที่มีความสำคัญต่ำ เห็นได้ว่าในกรณีคุณสมบัติปกติ Lasso และ EN ที่มีการกรองตัวแปรที่ไม่สำคัญออก แสดงค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า LR และ Ridge แต่ในกรณีคุณสมบัติแบบพหุนามนั้นแสดงค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า และการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ไม่ได้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองเชิงเส้น

แบบจำลอง LgR มีประสิทธิภาพดีในทุกกรณีสามารถจำแนกประเภทได้แม่นยำ (accuracy) มีค่า Precision, Recall และ F1-score ที่สูง บ่งบอกถึงประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีในการจำแนกความปลอดภัยของลาดดินประสิทธิภาพเพิ่มในกรณีคุณสมบัติพหุนาม ปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองอย่างเห็นได้ชัดแสดงใน Table 5 ที่แสดงค่า Precision, Recall และ F1-score สำหรับการจำแนกระดับความปลอดภัย โดยค่าเหล่านี้คำนวณเป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) จากผลการประเมินทั้งสามคลาส (Fail, Critical, Safe) วิธีการนี้ใช้เพื่อลดการเอนเอียงในกรณีที่จำนวนตัวอย่างในแต่ละคลาสไม่เท่ากัน

แบบจำลอง KNR และ SVR แสดงค่า MAPE และ MSE ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงเส้น ซึ่งบ่งชี้ถึงการคาดการณ์ที่แม่นยำน้อยกว่า ยิ่งในกรณีคุณสมบัติแบบพหุนามยิ่งเพิ่มตัวแปรให้กับแบบจำลองเหล่านี้ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพ

ในการทำนายลดลง อย่างไรก็ตาม การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์นำไปสู่การปรับปรุงที่สำคัญในค่า R² โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ KNR แต่ส่งผลให้ R² ของชุดข้อมูลการสอนสูงขึ้นและ R² ของชุดข้อมูลทดสอบต่ำลงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเกิด overfit ซึ่งไม่ผลดี วิธีการแก้ไขที่เป็นไปได้คือการใช้เทคนิค Cross-Validation หรือ Regularization

กลุ่มวิธีต้นไม้ (DTR, XTR, RFR, BR) ทำงานได้ดีโดยมีค่า MAPE และ MSE ต่ำและค่า R² สูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งในการทำนายเสถียรภาพของลาดดินสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Tien *et al.* (2019), Singh and Chakravarty (2023) และ Lin *et al.* (2021) การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ไม่แสดงผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงาน (Tien Bui *et al.*, 2019)

Table 3 Safety factor regression prediction performance

FS													
Model	Normal Feature				Polynomial Feature				Hyperparameter Tuning				
	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	
LR	1.31	6.9	0.70	0.81	0.47	3.41	0.81	0.91					
Ridge	1.31	6.89	0.70	0.81	0.45	3.40	0.81	0.91	1.31	6.90	0.70	0.81	
Lasso	0.93	6.74	0.69	0.81	0.62	4.06	0.78	0.89	1.31	6.90	0.70	0.81	
EN	0.93	6.71	0.69	0.81	0.53	3.92	0.79	0.89	1.31	6.90	0.70	0.81	
KNR	0.58	9.93	0.71	0.72	0.60	11.31	0.71	0.68	0.50	12.40	0.95	0.65	
SVR	0.48	9.96	0.62	0.72	0.66	10.12	0.61	0.72	0.44	8.19	0.61	0.77	
DTR	0.29	6.07	0.98	0.83	0.30	4.33	0.98	0.88	0.30	6.08	0.98	0.83	
XTR	0.27	4.35	0.98	0.88	0.27	4.22	0.98	0.88	0.27	4.34	0.98	0.88	
RFR	0.26	3.43	0.95	0.90	0.28	3.49	0.95	0.90	0.28	3.38	0.95	0.91	
BR	0.27	3.62	0.94	0.90	0.32	3.79	0.94	0.89	0.48	4.51	0.89	0.87	
GBR	0.35	2.68	0.88	0.93	0.35	3.40	0.91	0.91	2.56	18.35	0.47	0.49	
ABR	0.59	6.21	0.97	0.83	2.70	12.74	0.66	0.64	0.72	6.41	0.76	0.82	
CBR	0.47	3.22	0.96	0.91	0.31	3.44	0.97	0.90	3.58	32.24	0.11	0.10	
MLPR	0.77	9.8	0.64	0.73	2.46	94.18	-1.32	-1.63	0.82	8.98	0.57	0.75	

Table 4 Slope failure distance regression prediction performance

L/H													
Model	Normal Feature				Polynomial Feature				Hyperparameter Tuning				
	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	MAPE	MSE	R ² Train	R ² Test	
LR	0.24	0.64	0.68	0.71	0.22	0.48	0.80	0.78					
Ridge	0.24	0.64	0.68	0.71	0.23	0.48	0.80	0.78	0.24	0.64	0.68	0.71	
Lasso	0.28	0.71	0.64	0.68	0.26	0.68	0.69	0.69	0.24	0.64	0.68	0.71	
EN	0.27	0.69	0.65	0.68	0.25	0.58	0.74	0.73	0.24	0.64	0.68	0.71	
KNR	0.26	0.58	0.80	0.74	0.26	0.60	0.80	0.73	0.31	0.93	0.99	0.58	
SVR	0.23	0.64	0.75	0.71	0.24	0.75	0.70	0.66	0.22	0.66	0.67	0.70	
DTR	0.2	0.61	0.99	0.72	0.20	0.67	0.99	0.69	0.20	0.61	0.99	0.72	
XTR	0.17	0.45	0.99	0.80	0.17	0.48	0.99	0.78	0.17	0.47	0.99	0.78	
RFR	0.16	0.38	0.97	0.83	0.16	0.37	0.97	0.83	0.16	0.39	0.97	0.82	
BR	0.16	0.43	0.96	0.81	0.18	0.42	0.96	0.81	0.16	0.42	0.90	0.81	
GBR	0.16	0.35	0.90	0.84	0.16	0.36	0.93	0.84	0.43	1.20	0.46	0.45	
ABR	0.28	0.53	0.76	0.76	0.17	0.45	0.99	0.80	0.25	0.57	0.76	0.74	
CBR	0.15	0.38	0.97	0.83	0.15	0.34	0.98	0.85	0.58	2.19	0.01	0.00	
MLPR	0.5	2.19	0.19	0.00	3.24	87.9	-38.4	-39.1	0.59	3.65	-0.56	-0.67	

กลุ่ม Boosting (GBR, ABR, CBR) มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอยู่ระหว่างกลุ่มเชิงเส้นและกลุ่มต้นไม้ จากตารางเห็นได้ว่าการปรับแต่งไฮเปอร์ พารามิเตอร์ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบบจำลองเหล่านี้ เกิดขึ้นจากการเลือกชุดไฮเปอร์

พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้ไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่ละเอียดยิ่งขึ้นและขยายขอบเขตเพิ่มขึ้น

MLP แสดงประสิทธิภาพต่ำกว่าทุกแบบจำลองทั้งสามกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีคุณสมบัติแบบพหุนามนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก และค่า R^2 ตีตลาดบ่งบอกถึงปัญหาการลู่เข้าระหว่างฝึก ทำให้ผลลัพธ์ไม่น่าเชื่อถือ คุณสมบัติแบบพหุนามโดยทั่วไปช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับแบบจำลองส่วนใหญ่ กล่าวคือ การนำความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่เชิงเส้นระหว่างคุณสมบัติกับตัวแปรเป้าหมายมาพิจารณานั้นมีความสำคัญต่อการทำนายที่แม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางปฏิบัติทั่วไปในการใช้คุณสมบัติพหุนามในงานวิศวกรรมเทคนิค เนื่องจากลักษณะการไหลของดินมักแสดงความเป็นเส้นตรง

การใช้คุณสมบัติพหุนามช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพเฉพาะในกลุ่มแบบจำลองเชิงเส้น เช่น Linear Regression, Ridge, Lasso, และ Elastic Net อย่างมีนัยสำคัญ ผลการปรับปรุงนี้ชัดเจนในเรื่องการลดค่าความคลาดเคลื่อน (MAPE, MSE) และเพิ่มค่า R-squared ในแบบจำลองเชิงเส้น สำหรับแบบจำลองที่ไม่ใช่เชิงเส้น เช่น KNR, SVR, หรือ Random Forest การใช้คุณสมบัติพหุนามไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพ

ของแบบจำลองดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และในบางกรณีอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลง

จากผลการประเมินพบว่า การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ไม่ได้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง RFR และ GBR อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่ว่าจะพิจารณาจากตัวชี้วัดใด แสดงให้เห็นว่าโมเดลเหล่านี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่แล้วโดยไม่จำเป็นต้องปรับแต่งเพิ่มเติม อาจมาจากโครงสร้างของโมเดลที่มีความเสถียรและประสิทธิภาพสูงในตัวเอง การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์จึงไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพอย่างที่คาดหวัง

แบบจำลอง LgR มีประสิทธิภาพดีในทุกกรณี สามารถจำแนกประเภทได้แม่นยำ (accuracy) มีค่า Precision, Recall และ F1-score ที่สูง บ่งบอกถึงประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีในการจำแนกความปลอดภัยของลาดดิน ประสิทธิภาพเพิ่มในกรณีคุณสมบัติพหุนาม ปรับปรุงประสิทธิภาพแบบจำลองอย่างเห็นได้ชัดแสดงใน Table 5 ที่แสดงประสิทธิภาพในการจำแนกความปลอดภัยทั้งสามระดับแบบจำลอง KNC, SVC, DTC, XTC, RFC, BR, GBC, ABC, CBC, LS และ MLPC ส่วนใหญ่แสดงประสิทธิภาพที่เหมาะสมในส่วนของ Accuracy, Precision, Recall และ F1-score KNC และ SVC มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการจำแนกประเภทอื่นๆ เล็กน้อย โดยเฉพาะในด้าน Precision และ Recall ในแบบจำลอง DTC, XTC และ RFC ซึ่งมีพื้นฐานเป็น Tree Model มีประสิทธิภาพคงที่ในทุกกรณี หรือกล่าวอีกอย่างคือ คุณสมบัติพหุนาม และการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว

Table 5 Performance in predicting the safety level classification of soil slope.

Model	Normal Feature					Polynomial Feature				Hyperparameter Tuning			
	Acc.	Pre.	Recall	F1	AUC	Acc.	Pre.	Recall	F1	Acc.	Pre.	Recall	F1
LgR	0.88	0.67	0.63	0.63	0.90	0.92	0.95	0.71	0.73	0.87	0.58	0.62	0.60
KNC	0.79	0.55	0.58	0.56	0.84	0.78	0.56	0.59	0.57	0.83	0.62	0.62	0.62
SVC	0.84	0.54	0.58	0.56	0.90	0.78	0.48	0.47	0.47	0.85	0.67	0.67	0.67
DTC	0.85	0.73	0.70	0.71	0.75	0.84	0.67	0.66	0.66	0.82	0.65	0.60	0.62
XTC	0.92	0.86	0.77	0.80	0.89	0.91	0.80	0.76	0.78	0.90	0.76	0.66	0.65
RFC	0.90	0.77	0.69	0.71	0.91	0.91	0.78	0.72	0.74	0.89	0.59	0.63	0.61
BC	0.86	0.71	0.69	0.70	0.89	0.85	0.71	0.65	0.67	0.92	0.82	0.73	0.75
GBC	0.87	0.67	0.63	0.65	0.93	0.90	0.77	0.71	0.72	0.84	0.67	0.66	0.66
ABC	0.84	0.68	0.65	0.66	0.89	0.83	0.70	0.69	0.68	0.88	0.59	0.61	0.60
CBC	0.89	0.75	0.71	0.73	0.94	0.90	0.74	0.69	0.70	0.90	0.72	0.67	0.67
LS	0.81	0.60	0.60	0.60	0.82	0.16	0.64	0.34	0.13	0.82	0.50	0.58	0.53
MLPC	0.90	0.82	0.68	0.68	0.95	0.83	0.65	0.58	0.60	0.93	0.84	0.79	0.81

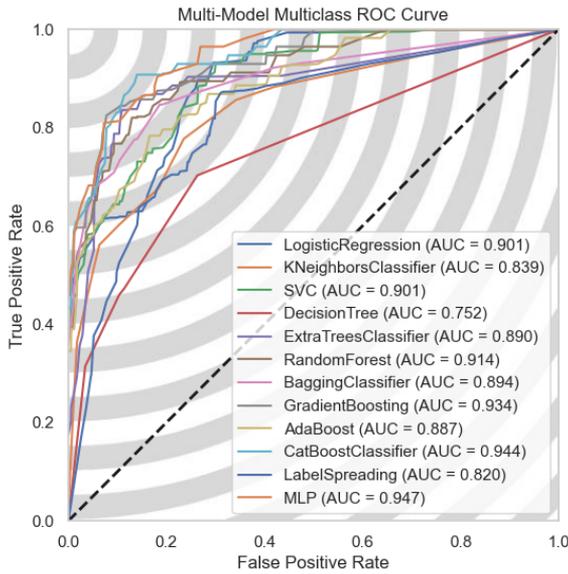


Figure 6 ROC curves and AUC values of the classifier models

จากการประเมินผลใน Table 5 พบว่า MLP Classifier (MLPC) มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นหลังการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ โดยเฉพาะในด้าน Accuracy, Precision Recall และ F1-score อย่างไรก็ตามการใช้สมบัติพหุนามทำให้ประสิทธิภาพของ MLPC ลดลง การใช้สมบัติพหุนามในแบบจำลองที่มีโครงสร้างซับซ้อนอยู่แล้ว เช่น MLPC อาจไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเสมอไป และในบางกรณีอาจทำให้เกิดการ overfitting ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง

Figure 6 แสดงผล ROC curves ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ AUC ที่คำนวณจากทั้งสามคลาส (Fail, Critical, Safe) โดยใช้วิธี One-vs-Rest (OvR) การเฉลี่ยนี้สะท้อนผลการจำแนกโดยรวมของโมเดลเพื่อให้การนำเสนอเข้าใจง่าย อย่างไรก็ตาม ค่า AUC สำหรับแต่ละคลาส ได้แก่ Fail vs [Critical, Safe], Critical vs [Fail, Safe], และ Safe vs [Fail, Critical] ในแบบจำลองการจำแนกชนิดต่างๆ สามารถแบ่งได้เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพยอดเยี่ยม ดีมาก และดีได้ดังนี้

แบบจำลองประสิทธิภาพยอดเยี่ยม: แบบจำลอง MLP แสดงค่า AUC สูงสุด มีประสิทธิภาพสูงสุดในบรรดาแบบจำลองจำแนกทั้งหมด รองมาคือ CBC ถึงแม้จะมีค่า AUC ต่ำกว่าของ MLP แต่อยู่ใกล้จุดสมบูรณแบบ (พิกัด 0, 1) กว่า MLP ถัดมาคือแบบจำลอง Gradient Boosting สร้างแผนผังการตัดสินใจหลายแบบและรวมผลลัพธ์เพื่อปรับปรุงความแม่นยำ สะท้อนให้เห็นด้วยใน AUC ที่สูง แบบจำลอง RandomForest จะสร้างแผนผังการตัดสินใจหลายแบบและรวมผลลัพธ์เข้าด้วยกันนำไปสู่ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดท้ายในกลุ่มนี้คือแบบจำลอง LgR และ SVC มีค่า AUC เท่ากัน แบบจำลอง

ประสิทธิภาพดีมาก: แบบจำลอง BC XTC ADB SVC KNC และ LS กลุ่มสุดท้ายแบบจำลองประสิทธิภาพดีคือ Decision Tree

เมื่อพิจารณาถึงความเสถียรและสมรรถนะของแบบจำลองแล้ว วิธีแบบรวม เช่น RandomForest, ExtraTrees และ Gradient Boosting โดยทั่วไปจะแสดงค่า AUC ที่สูงกว่าบ่งชี้ว่าการรวมหลายแบบจำลองจะช่วยลดความแปรปรวน (variance) และความเอนเอียง (bias) ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความเสถียรภาพและประสิทธิภาพของแบบจำลอง

สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning, ML) ในการทำนายเสถียรภาพและระยะวิกฤติของลาดดินโดยพิจารณาจากตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (C) มุมเสียดทานภายใน (Phi) มุมลาดชัน (Slope) และความสูงของลาดดิน (H) ผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า

Random Forest มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในการทำนายอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, FS) และระยะวิกฤติของลาดดินต่อความสูง (L/H) นอกจากนี้

การใช้คุณสมบัติพหุนามช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงเส้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ซับซ้อน เช่น Support Vector Machine (SVM) และ Multilayer Perceptron (MLP) ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในการทำนายระดับความปลอดภัยของลาดดิน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยเฉพาะการทำนายเสถียรภาพลาดดิน มีศักยภาพสูงในการทำนายผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม เช่น วิธีสมดุลจำกัด (Limit Equilibrium Method, LEM) แบบจำลอง Random Forest ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในส่วนของการทำนายถดถอย (FS และ L/H) และการจำแนกระดับความปลอดภัย (Fail, Critical, Safe) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการที่แบบจำลองนี้มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อนและมีความแปรปรวนสูง

นอกจากนี้ การใช้คุณสมบัติพหุนามในแบบจำลองเชิงเส้น เช่น Linear Regression, Ridge และ Lasso ช่วยให้แบบจำลองสามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรได้ดีขึ้น ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (MAPE, MSE) ลดลง และค่าความผันแปรตอบสนอง (R^2) เพิ่มขึ้น การปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ก็แสดงผลลัพธ์ในเชิงบวก

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแบบจำลองที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น SVM และ MLP ที่ต้องการการปรับแต่งเพื่อให้สามารถจับรูปแบบที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สำหรับบางแบบจำลอง การใช้คุณสมบัติพหุนามอาจส่งผลให้เกิดการ overfitting ซึ่งบ่งชี้ว่าการเลือกคุณสมบัติพหุนามและการปรับแต่งไฮเปอร์พารามิเตอร์ต้องทำอย่างระมัดระวัง

ในภาพรวม การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสามารถเป็นทางเลือกที่ดีในการเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำนายเสถียรภาพของลาดดิน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและวางแผนงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคในการป้องกันและลดความเสี่ยงจากการพังทลายของลาดดิน

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐวุฒิ แกมเงิน, ปกรณ์ ล่องทอง, พงศศรันย์ ทองหนู้อย, กนกวรรณ ละอองศรี, อนามัย เทศกะทีก, พีรพล ศิริพงศ์ วุฒิกุล, ณฐนนท์ เทพตะขบ และวิริยะ มหิกุล. (2023). การเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายระดับความรุนแรงของความผิดปกติของความยืดหยุ่นปอดของพนักงานโรงงาน. *Science and Technology Journal Mahasarakham University*, 43(2), 84–95.
- สุภาววิณี ขันคำ และสิโรรัตน์ จันทาม. (2023). แบบจำลองการพยากรณ์สำหรับปริมาณการส่งออกเครื่องเทศของประเทศไทย. *Science and Technology Journal Mahasarakham University*, 43(1), 74–83.
- Azarafza, M., Azarafza, M., Akgün, H., Atkinson, P. M., & Derakhshani, R. (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 11(1), 24112.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5(1), 7–17.
- Fellenius, W. (1927). *Erdstatische statik*. Meyer and Zeller.
- Harabinová, S., & Panulinová, E. (2020). *Impact of shear strength parameters on slope stability*. MATEC Web of Conferences, 310, 00040. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031000040>
- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.
- Huang, F., Xiong, H., Chen, S., Lv, Z., Huang, J., Chang, Z., & Catani, F. (2023). Slope stability prediction based on a long short-term memory neural network: Comparisons with convolutional neural networks, support vector machines and random forest models. *International Journal of Coal Science & Technology*, 10(1), 18.
- Huang, F., Ye, Z., Jiang, S. H., Huang, J., Chang, Z., & Chen, J. (2021). *Uncertainty study of landslide susceptibility prediction considering the different attribute interval numbers of environmental factors and different data-based models*. Catena, 202, 105250.
- Lin, S., Zheng, H., Han, C., Han, B., & Li, W. (2021). Evaluation and prediction of slope stability using machine learning approaches. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(4), 821–833.
- Morgenstern, N. U., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79–93.
- Nikoobakht, S., Azarafza, M., Akgün, H., & Derakhshani, R. (2022). Landslide susceptibility assessment by using convolutional neural network. *Applied Sciences*, 12(12), 5992.
- Pham, B. T., Vu, V. D., Costache, R., Phong, T. V., Ngo, T. Q., Tran, T. H., ... & Prakash, I. (2022). Landslide susceptibility mapping using state-of-the-art machine learning ensembles. *Geocarto International*, 37(18), 5175–5200.
- Singh, S. K., & Chakravarty, D. (2023). Assessment of slope stability using classification and regression algorithms subjected to internal and external factors. *Archives of Mining Sciences*, 68(1), 87–102.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Géotechnique*, 17(1), 11–26.
- Tien Bui, D., Moayed, H., Gör, M., Jaafari, A., & Foong, L. K. (2019). Predicting slope stability failure through machine learning paradigms. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9), 395.
- Wang, Y., Sun, D., Wen, H., Zhang, H., & Zhang, F. (2020). Comparison of random forest model and frequency ratio model for landslide susceptibility mapping (LSM) in Yunyang County (Chongqing, China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4206.

World Bank. (2020). *Global landslide hazard 1 [Data set]*.

World Bank Data Catalog. <https://datacatalog.world-bank.org/dataset/global-landslide-hazard-1>

World Health Organization. (2023). *Landslides*. <https://www.who.int/health-topics/landslides>

WSDOT. (2013). *Geotechnical design manual M 46-03*.
Washington State Department of Transportation.

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ในการตรวจวัดและประเมินปริมาณฝุ่นละอองในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

Application of LIDAR technology for monitoring and assessing particulate matter at Kanchanaburi Rajabhat University

อาทิศย์ เรืองศรี¹, พัฒน์ศรัณย์ เลหาไพบูลย์² และ อรณิชา คงวุฒิ^{3*}

Artit Ruangsri¹, Phatsaran Laohhapaiboon² and Ornnicha Kongwut^{3*}

Received: 16 October 2024 ; Revised: 17 January 2025 ; Accepted: 24 February 2025

บทคัดย่อ

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญระดับโลก ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในสถาบันการศึกษาที่มีประชากรหนาแน่น การตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานมีข้อจำกัดด้านความถี่และพื้นที่ครอบคลุม การวิจัยนี้จึงศึกษาความสอดคล้องของการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ระหว่างเครื่องตรวจวัดแบบ LIDAR ที่ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี กับข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบ Beta Attenuation ของกรมควบคุมมลพิษที่ติดตั้ง ณ ตำบลปากแพรก ซึ่งมีระยะห่าง 15 กิโลเมตร โดยเก็บข้อมูลจาก 5 จุดหลักภายในมหาวิทยาลัยเป็นระยะเวลา 4 เดือน พร้อมบันทึกปัจจัยแวดล้อมและปริมาณการจราจร ผลการศึกษาพบว่าบริเวณประตูทางเข้ามีค่าฝุ่นละอองสูงสุด (PM_{2.5}: 28.5 ± 3.2, PM₁₀: 52.3 ± 5.1 µg/m³) และพื้นที่สีเขียวมีค่าต่ำสุด (PM_{2.5}: 17.3 ± 2.0, PM₁₀: 32.8 ± 3.5 µg/m³) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าปริมาณการจราจรมีความสัมพันธ์เชิงบวก (r = 0.71) ขณะที่ความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงลบ (r = -0.58) กับระดับฝุ่นละออง ผลการศึกษานี้นำไปสู่การพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้ LIDAR สำหรับการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศในสถาบันการศึกษาอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: LIDAR, มลพิษทางอากาศ, PM_{2.5}, PM₁₀, คุณภาพอากาศในมหาวิทยาลัย

Abstract

Air pollution is a significant global environmental issue, profoundly impacting human health, ecosystems, and sustainable economic development. Particularly in densely populated educational institutions, standard measurement methods often face limitations in terms of frequency and spatial coverage. This study, therefore, investigates the consistency of particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) measurements between a LIDAR system installed at Kanchanaburi Rajabhat University and data from a Beta Attenuation Monitor operated by the Pollution Control Department located in Pak Phraek Subdistrict, 15 kilometers away. Data were collected from five key points within the university over four months, alongside environmental factors and traffic volume. The findings reveal that the area near the main entrance recorded the highest particulate levels (PM_{2.5}: 28.5 ± 3.2, PM₁₀: 52.3 ± 5.1 µg/m³), while green spaces showed the lowest levels

¹ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

² หจก.บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

³ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

¹ The Demonstration School of Kanchanaburi Rajabhat University

² Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkae, Bangkok

³ Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University

* Corresponding author, e-mail: ornnicha.k@kru.ac.th

($PM_{2.5}$: 17.3 ± 2.0 , PM_{10} : $32.8 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Correlation analysis indicates a positive relationship between traffic volume and particulate levels ($r = 0.71$), whereas wind speed exhibits a negative correlation ($r = -0.58$). This research contributes to the development of guidelines for effectively applying LIDAR technology in monitoring and managing air quality in educational institutions.

Keywords: LIDAR, air pollution, $PM_{2.5}$, PM_{10} , university air quality

บทนำ

มลพิษอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญระดับโลกส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน (Seigneur, 2019) องค์การอนามัยโลกรายงานว่ามลพิษอากาศเป็นสาเหตุการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรของประชากรโลกถึง 7 ล้านคนต่อปี โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา (Canton, 2021) ประเทศไทยก็เผชิญกับปัญหานี้อย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในเขตเมืองและพื้นที่อุตสาหกรรม

จังหวัดกาญจนบุรีแม้จะได้ชื่อว่าเป็นเมืองธรรมชาติและแหล่งท่องเที่ยวสำคัญแต่ก็ไม่อาจหลีกเลี่ยงปัญหาหมอกพิษทางอากาศได้ จากรายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2560-2564 จังหวัดกาญจนบุรีมีแนวโน้มของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายปีสูงถึง 25.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ที่ 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2566)

สถาบันการศึกษาเป็นหนึ่งในพื้นที่สำคัญที่ควรได้รับการเฝ้าระวังและตรวจสอบคุณภาพอากาศอย่างเข้มงวดเนื่องจากเป็นสถานที่ที่มีประชากรหนาแน่นโดยเฉพาะกลุ่มเยาวชนซึ่งเป็นวัยที่อ่อนไหวต่อผลกระทบของมลพิษ (Pedelacq *et al.*, 2022) การศึกษาของ Gujrathi (2021) พบว่าการได้รับมลพิษทางอากาศในระดับสูงส่งผลกระทบต่อพัฒนาการทางสมองและความสามารถในการเรียนรู้ของเด็กและเยาวชน นอกจากนี้ Terao and Funatsu (2021) ยังชี้ให้เห็นว่าการลดระดับมลพิษทางอากาศในสถานศึกษาสามารถส่งผลดีต่อสุขภาพและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ

มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรีในฐานะสถาบันอุดมศึกษาชั้นนำของจังหวัด มีบทบาทสำคัญในการเป็นต้นแบบด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและการส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีให้แก่ชุมชน การตรวจวัดและเฝ้าระวังมลพิษทางอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ไม่เพียงแต่เพื่อ

ปกป้องสุขภาพของนักศึกษาและบุคลากร แต่ยังเป็นการสร้างองค์ความรู้และแนวปฏิบัติที่ดีสำหรับชุมชนโดยรอบ

การตรวจวัดมลพิษทางอากาศด้วยวิธีมาตรฐาน เช่น การใช้เครื่องวัดอนุภาคแบบ Gravimetric หรือ Beta Attenuation เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูงและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้มีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการในด้านความถี่ของการวัด พบว่าต้องใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างค่อนข้างนานทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของมลพิษในอากาศแบบทันที (Real-time) ได้ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการครอบคลุมพื้นที่เนื่องจากเครื่องมือมีต้นทุนสูงในการติดตั้งและต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอโดยผู้เชี่ยวชาญ (Liu *et al.*, 2022) ข้อจำกัดเหล่านี้ส่งผลให้การเฝ้าระวังคุณภาพอากาศในพื้นที่ขนาดใหญ่เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยี LIDAR จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถตรวจวัดมลพิษทางอากาศได้แบบ Real-time และครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างในการตรวจวัดครั้งเดียว (Korotcenkov, 2019)

การนำเทคโนโลยีสมัยใหม่อย่างเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะเทคนิค LIDAR (Light Detection and Ranging) จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำ รวดเร็ว และครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างได้ดีกว่า (Butt *et al.*, 2018) การศึกษาล่าสุดของ Mifsud *et al.* (2018) แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี LIDAR สามารถตรวจวัด $PM_{2.5}$ ได้แม่นยำถึง 90% เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐานและยังสามารถให้ข้อมูลเชิงพื้นที่และเวลาที่ละเอียดกว่า

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้เทคโนโลยีเลเซอร์และวิธีการตรวจวัดแบบมาตรฐานในบริบทของสถาบันศึกษาอย่างมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ไม่เพียงแต่จะช่วยพัฒนาระบบการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถาบันการศึกษาอื่น ๆ และชุมชนโดยรอบ นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมในบริบทของประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับ

เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ (UN Sustainable Development Goals) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 3 (สุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี) และเป้าหมายที่ 11 (เมืองและชุมชนที่ยั่งยืน) (Nations, 2017)

ด้วยเหตุนี้การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความสอดคล้องของการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ระหว่างเครื่องตรวจวัดแบบ LIDAR ที่ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี กับข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบ Beta Attenuation ของกรมควบคุมมลพิษที่ติดตั้ง ณ ตำบลปากแพรก ซึ่งมีระยะห่าง 15 กิโลเมตร เพื่อพัฒนาแนวทางการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศที่มีประสิทธิภาพ ทันสมัย และเหมาะสมกับบริบทของสถาบันการศึกษาในประเทศไทย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ของเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบ LIDAR ที่ติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี กับข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบอัตโนมัติของกรมควบคุมมลพิษที่ติดตั้งในพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อประเมินความสอดคล้องของการกระจายตัวของฝุ่นละอองในพื้นที่ศึกษา
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับมลพิษอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี โดยใช้ข้อมูลจากเทคโนโลยีเลเซอร์
3. เพื่อพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ในการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศที่เหมาะสมกับบริบทของสถาบันการศึกษาในประเทศไทย

ขอบเขตของการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา: มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี พื้นที่โดยรอบมหาวิทยาลัยในรัศมี 5 กิโลเมตร เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมลพิษทางอากาศของ ต.ปากแพรก อ.เมือง จ.กาญจนบุรี: ดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) แบบเรียลไทม์) ของจังหวัดกาญจนบุรี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมห่างจากจุดวัด 15 กิโลเมตร
2. ระยะเวลา: ดำเนินการวิจัยเป็นระยะเวลา 1 ภาคการศึกษา (ประมาณ 4 เดือน) เริ่มต้นในช่วงเปิดภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2566 (เดือนสิงหาคม) และสิ้นสุดก่อนปิดภาคเรียน (เดือนพฤศจิกายน)
3. การเก็บข้อมูล: ใช้ระบบ LIDAR ตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ในพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง

4. ข้อมูลเปรียบเทียบ: ใช้ข้อมูลที่มีการรายงานอยู่แล้วจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศมลพิษทางอากาศของ ต.ปากแพรก อ.เมือง จ.กาญจนบุรี: ดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) แบบเรียลไทม์) ของจังหวัดกาญจนบุรี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมห่างจากจุดวัด 15 กิโลเมตร (Figure 1) รวบรวมข้อมูลย้อนหลัง 1 ปี เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

5. ตัวแปรที่ศึกษา:

ตัวแปรหลัก ปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} และ PM₁₀ ตัวแปรรอง อุณหภูมิ ความชื้น ทิศทางลม และความเร็วลม (ใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยากาญจนบุรี)

6. การวิเคราะห์ข้อมูล: เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากระบบ LIDAR กับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดแบบมาตรฐาน วิเคราะห์ความแม่นยำของระบบ LIDAR เทียบกับข้อมูลอ้างอิง และศึกษาการกระจายตัวของมลพิษอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัย และความสัมพันธ์กับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยากาญจนบุรี

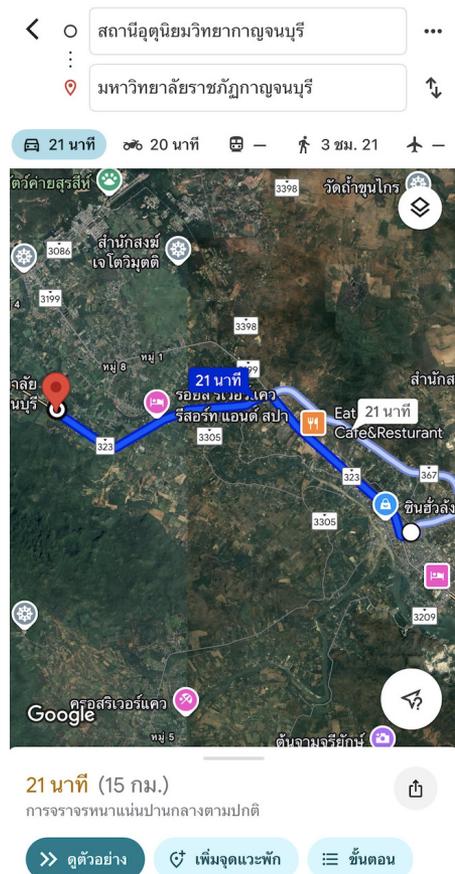


Figure 1 Real-time air quality monitoring stations location and distance between Kanchanaburi Rajabhat University and Pak Phreak air quality monitoring station, Mueang District, Kanchanaburi Province (Source: Google Maps, 2024)

7. ข้อจำกัด: การศึกษานี้ไม่ได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดแบบมาตรฐานเพิ่มเติมแต่ใช้ข้อมูลที่มีการรายงานอยู่แล้วเป็นหลัก ซึ่งความแม่นยำของการเปรียบเทียบอาจขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างพื้นที่ศึกษาและสถานีตรวจวัดที่มีอยู่

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิชาการและการจัดการสิ่งแวดล้อม :

- ได้แนวทางการใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ (LIDAR) ในการตรวจวัดมลพิษอากาศในบริบทของสถาบันการศึกษาไทย

- มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรีและสถาบันการศึกษาอื่น ๆ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผนและจัดการคุณภาพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ด้านสุขภาพและคุณภาพชีวิต :

- นักศึกษา บุคลากร และชุมชนโดยรอบมหาวิทยาลัยจะได้รับข้อมูลคุณภาพอากาศที่แม่นยำและทันสมัย ช่วยในการป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพ

- ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดนโยบายและมาตรการจัดการคุณภาพอากาศในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ

การทดลอง

1. ทบทวนวรรณกรรม

1.1 มลพิษอากาศในพื้นที่การศึกษา: มลพิษอากาศในสถาบันการศึกษาเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากผลกระทบต่อสุขภาพและการเรียนรู้ของนักเรียนนักศึกษา Huang (2022) ศึกษาคุณภาพอากาศในโรงเรียนทั่วโลกพบว่าระดับ $PM_{2.5}$ ในห้องเรียนมักสูงกว่าค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลกโดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา Health Effects Institute (2024) วิจัยผลกระทบของมลพิษอากาศต่อพัฒนาการทางสมองของเด็ก พบว่าการสัมผัสกับ $PM_{2.5}$ ในระยะยาวส่งผลเสียต่อความจำและการเรียนรู้ ในประเทศไทย ชัชชนก รักษาบางแหลม (2564) ศึกษาในระดับ $PM_{2.5}$ ในจังหวัดกรุงเทพฯ พบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงกว่ามาตรฐานในช่วงฤดูแล้ง โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้ถนนใหญ่

1.2 วิธีการวัดมลพิษอากาศแบบมาตรฐาน: วิธีการวัดมลพิษทางอากาศแบบมาตรฐานมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันดังนี้

- Gravimetric Method: เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดย Barauskas *et al.* (2023) อธิบายว่าวิธีนี้ใช้การเก็บตัวอย่างฝุ่นบนแผ่นกรอง แล้วชั่งน้ำหนัก

ก่อนและหลังเก็บตัวอย่าง ข้อดีคือมีความแม่นยำสูง แต่ใช้เวลานานและไม่สามารถวัดแบบต่อเนื่องได้

- Beta Attenuation Monitoring (BAM): Shukla and Aggarwal (2022) อธิบายว่าวิธีนี้ใช้หลักการดูดกลืนรังสีเบตาของอนุภาคฝุ่น สามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ แต่มีต้นทุนสูงและต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ

- Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM): Bräuer and D'Agostino (2018) พัฒนาวิธีนี้ซึ่งใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของการสั่นของแผ่นกรองเพื่อวัดมวลของฝุ่น สามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ แต่อาจมีปัญหาในการวัดสารระเหยง่าย

- Light Scattering Method: เป็นวิธีที่ใช้การกระเจิงของแสงเมื่อกระทบกับอนุภาคฝุ่นเพื่อวัดความเข้มข้น สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของฝุ่นละอองในอากาศแบบทันที (Real-time) ได้ แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนในการวัดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูง (Kim *et al.*, 2023)

1.3 หลักการทำงานของเลเซอร์และเทคโนโลยี LIDAR เป็นเทคโนโลยีที่ใช้แสงเลเซอร์ในการตรวจวัดระยะทางและคุณสมบัติของวัตถุเป้าหมาย McManamon (2019) อธิบายหลักการพื้นฐานของ LIDAR ว่าใช้การส่งพัลส์เลเซอร์และวัดแสงที่สะท้อนกลับมาทำให้สามารถวัดระยะทางและความเข้มข้นของอนุภาคในอากาศ โดยนำเสนอการประยุกต์ใช้ LIDAR ในการวัดมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะการวัด $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ซึ่งให้ความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลาสูงกว่าวิธีมาตรฐาน และแสดงให้เห็นว่า LIDAR สามารถใช้ในการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองในแนวดิ่ง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการเข้าใจการเคลื่อนที่ของมลพิษในบรรยากาศ

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทยและต่างประเทศ: งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ LIDAR ในการวัดมลพิษทางอากาศมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในและต่างประเทศ

ในต่างประเทศ: Luo *et al.* (2015) ใช้ LIDAR ร่วมกับเครื่องวัดแบบมาตรฐานในการศึกษาการกระจายตัวของ $PM_{2.5}$ ในเมืองปักกิ่ง พบว่า LIDAR ให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ละเอียดกว่าและสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระยะสั้นได้ดี Okubo *et al.* (2023) ใช้ข้อมูลจาก LIDAR ดาวเทียมร่วมกับข้อมูลภาคพื้นดินในการสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของ $PM_{2.5}$ ในสหรัฐอเมริกา แสดงให้เห็นศักยภาพในการใช้ LIDAR สำหรับการติดตามมลพิษในพื้นที่กว้าง

ในประเทศไทย: สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สดร.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) (กลุ่มวิจัยวิทยาศาสตร์

บรรยากาศ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), 2566) เผยกราฟแสดงค่าฝุ่น PM_{2.5} จากเทคโนโลยีไลดาร์ (LIDAR) บ่งชี้ค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กในแต่ละช่วงเวลา นำข้อมูลมาประยุกต์กับแบบจำลองคุณภาพอากาศ สามารถคาดการณ์อัตราการเกิดฝุ่นล่วงหน้าได้ 3 วัน แม่นยำถึง 80%

งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยี LIDAR ในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดและติดตามมลพิษทางอากาศ อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในบริบทของสถาบันการศึกษาในประเทศไทยยังมีความท้าทายหลายประการ เช่น ข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดหาและบำรุงรักษาอุปกรณ์ ความต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางในการดูแลระบบ รวมถึงการขาดข้อมูลเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานในพื้นที่เดียวกันที่จะช่วยยืนยันความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาและพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ให้เหมาะสมกับบริบทของสถาบันการศึกษาไทย เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศ

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.1 ระบบ LIDAR: ระบบ LIDAR ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบ scanning Doppler lidar รุ่น CL-51 ผลิตโดยบริษัท Vaisala (Figure 2) ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้:

ก) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

- ชนิด: Nd:YAG pulsed laser
- ความยาวคลื่น: 532 นาโนเมตร
- พลังงานต่อพัลส์: 20 มิลลิจูล
- อัตราการยิง: 20 เฮิร์ตซ์

ข) ระบบรับสัญญาณ

- กล้องโทรทรรศน์: แบบสะท้อนแสง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

- ตัวตรวจจับ: Photomultiplier tube (PMT) รุ่น H10721-210

- ระบบกรองแสง: แบบแถบแคบ ความกว้างแถบ 1.0 นาโนเมตร

- มุมรับสัญญาณ: 0.1 มิลลิเรเดียน

ค) ระบบบันทึกและประมวลผลข้อมูล

- ระบบ Data acquisition: ความเร็ว 500 MHz ความละเอียด 12-bit

- หน่วยประมวลผล: Intel Core i7 พร้อม RAM 32GB

- ระบบควบคุม: ซอฟต์แวร์ BL-View รุ่น 2.1

- ความสามารถในการบันทึก: ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพอากาศ

- เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์: Vaisala HMP155

- เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม: Vaisala WXT536

- ความสูงการติดตั้ง: 10 เมตรจากพื้นดิน

- อัตราการบันทึกข้อมูล: ทุก 1 นาที

2.3 ระบบระบุพิกัด

- เครื่อง GPS: Trimble NetR9

- ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง: ±0.5 เมตร

2.4 การสอบเทียบระบบ

ก) การสอบเทียบเชิงแสง

- เป้าหมายมาตรฐาน: แผ่นสะท้อนแสง ค่าการสะท้อน 99%

- ระยะทดสอบ: 100, 500, และ 1000 เมตร

- ความถี่การสอบเทียบ: ก่อนและหลังการทดลอง

ข) การสอบเทียบการวัดฝุ่น

- อุปกรณ์อ้างอิง: BAM-1020 Beta Attenuation

Monitor

- ระยะเวลาสอบเทียบ: 48 ชั่วโมงต่อเนื่อง

- พารามิเตอร์ที่สอบเทียบ: PM_{2.5} และ PM₁₀

2.5 ระบบฐานข้อมูลและการวิเคราะห์ (Figure 3)

- โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ: R version 4.1.0

- โปรแกรมประมวลผลสัญญาณ: MATLAB R2021a

- ระบบจัดเก็บข้อมูล: MySQL Database Server

2.6 มาตรฐานความปลอดภัย

- การป้องกันไฟฟ้า: ระบบ UPS ขนาด 3 kVA

- การควบคุมอุณหภูมิ: ระบบปรับอากาศแบบควบคุมความชื้น

- การป้องกันน้ำและฝุ่น: มาตรฐาน IP65

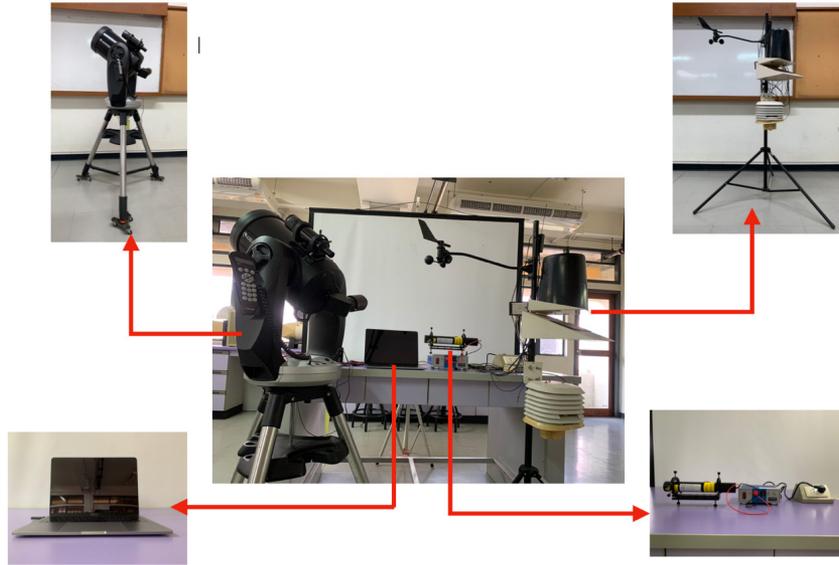


Figure 2 Research LIDAR equipment

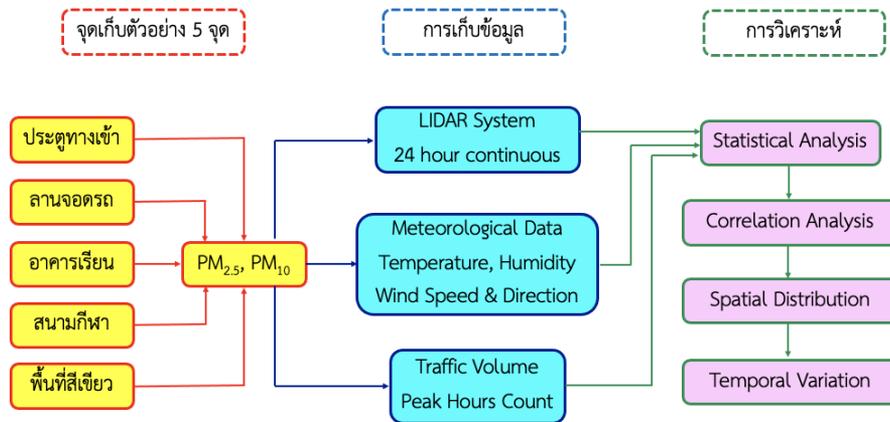


Figure 3 Research methodology diagram

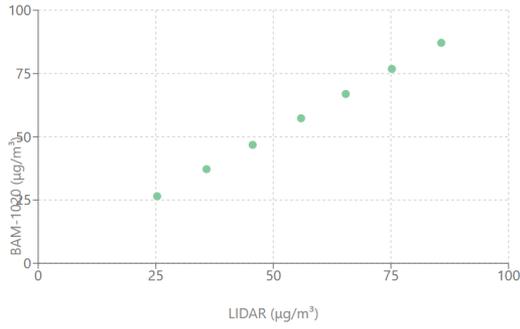
3. การออกแบบระบบ LIDAR สำหรับวัดมลพิษ

- การติดตั้ง ออกแบบให้เป็นระบบแบบเคลื่อนที่ได้ ติดตั้งบนรถเข็นพิเศษมีระบบป้องกันการสั่นสะเทือนและควบคุมอุณหภูมิ

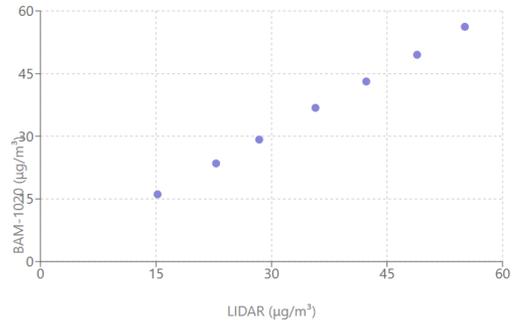
- การปรับแต่งระบบ ปรับความละเอียดเชิงระยะ ให้เหมาะสมกับพื้นที่มหาวิทยาลัย (ประมาณ 10 เมตร) ตั้งค่าการวัดให้ครอบคลุมระยะทางถึง 2 กิโลเมตร

- การสอบเทียบ ใช้เป้าหมายที่ทราบค่าการสะท้อนแสงแน่นอนในการสอบเทียบ ทำการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานก่อนเริ่มการทดลอง (Figure 4)

การสอบเทียบการวัด PM10

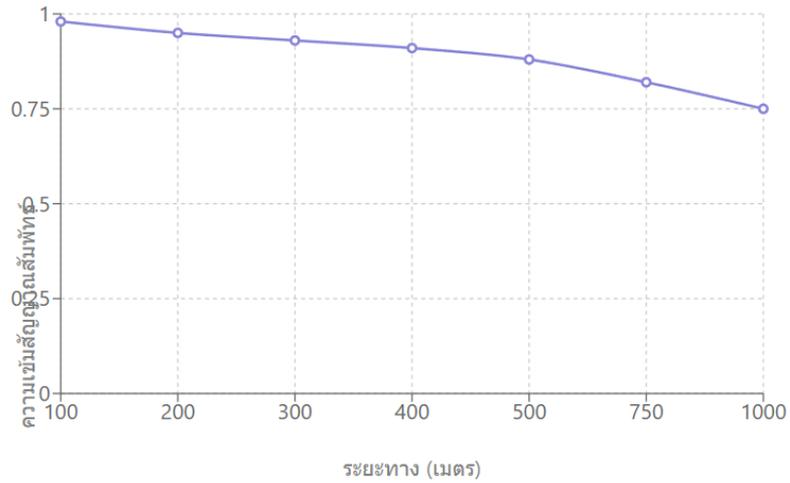


การสอบเทียบการวัด PM2.5



a.

การสอบเทียบเชิงแสงตามระยะทาง



b.

Figure 4 a. Calibration curves of PM_{2.5} and PM₁₀ measurements. b. Relative Signal Strength (RSS)

4. การเลือกจุดตรวจวัดใหม่มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

- จุดหลัก 5 จุดดังนี้ บริเวณประตูทางเข้าหลัก มหาวิทยาลัย (ใกล้ถนนใหญ่) ลานจอดรถหลัก บริเวณอาคารเรียนหลัก สนามกีฬากลางแจ้ง และพื้นที่สีเขียวของมหาวิทยาลัย (Figure 5)

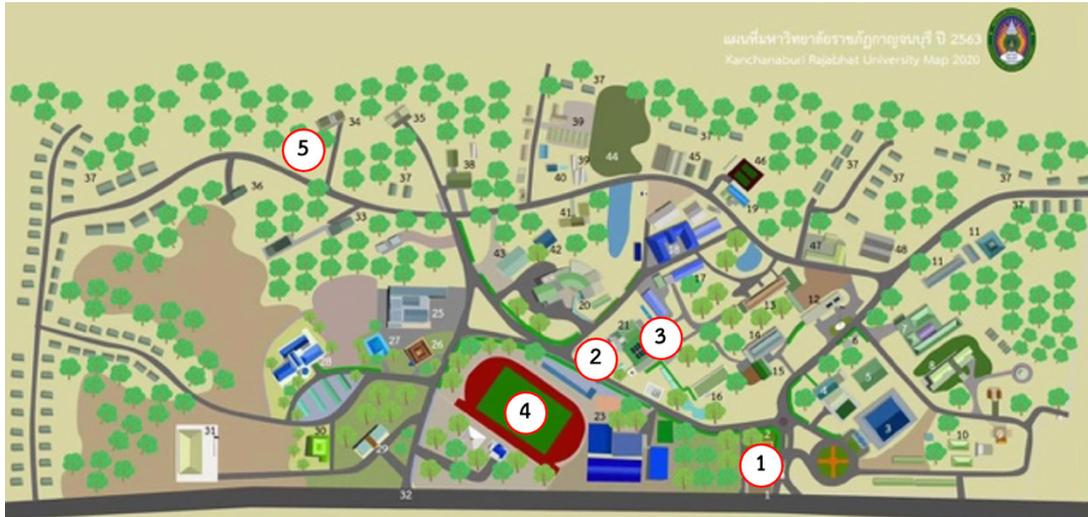


Figure 5 Distribution of sampling locations at Kanchanaburi Rajabhat University 1. Main entrance gate, 2. Main parking area, 3. Main academic building, 4. Outdoor sports field, 5. Green area

receive from: www.kru.ac.th

- เกณฑ์การเลือกจะครอบคลุมพื้นที่ที่มีกิจกรรมของนักศึกษาและบุคลากรหนาแน่น กระจายให้ทั่วพื้นที่มหาวิทยาลัย และรวมจุดที่คาดว่าจะมีระดับมลพิษแตกต่างกัน

5. ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

- การวัดด้วยระบบ LIDAR ทำการวัดต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงที่แต่ละจุด เป็นเวลา 7 วัน บันทึกข้อมูลทุก 5 นาที ทำการ scan แนวตั้งและแนวราบเพื่อสร้างภาพ 3 มิติของการกระจายตัวของฝุ่นละออง และบันทึกข้อมูลสภาพอากาศควบคู่ไปด้วย (Figure 6)

- การวัดด้วยวิธีมาตรฐาน (ใช้ข้อมูลจากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ) รวบรวมข้อมูล $PM_{2.5}$ และ PM_{10} จากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ต.ปากแพรก อ.เมือง จ.กาญจนบุรี โดยเก็บข้อมูลย้อนหลัง 1 ปี และข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกับการทดลอง LIDAR บันทึกค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงและรายวัน และรวบรวมข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยากาญจนบุรี บันทึกปริมาณการจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน (7:00-9:00 น. และ 16:00-18:00 น.) โดยนับจำนวนรถที่ผ่านบริเวณประตูทางเข้าหลักมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี พบปริมาณรถยนต์เฉลี่ย 250-300 คันต่อชั่วโมง

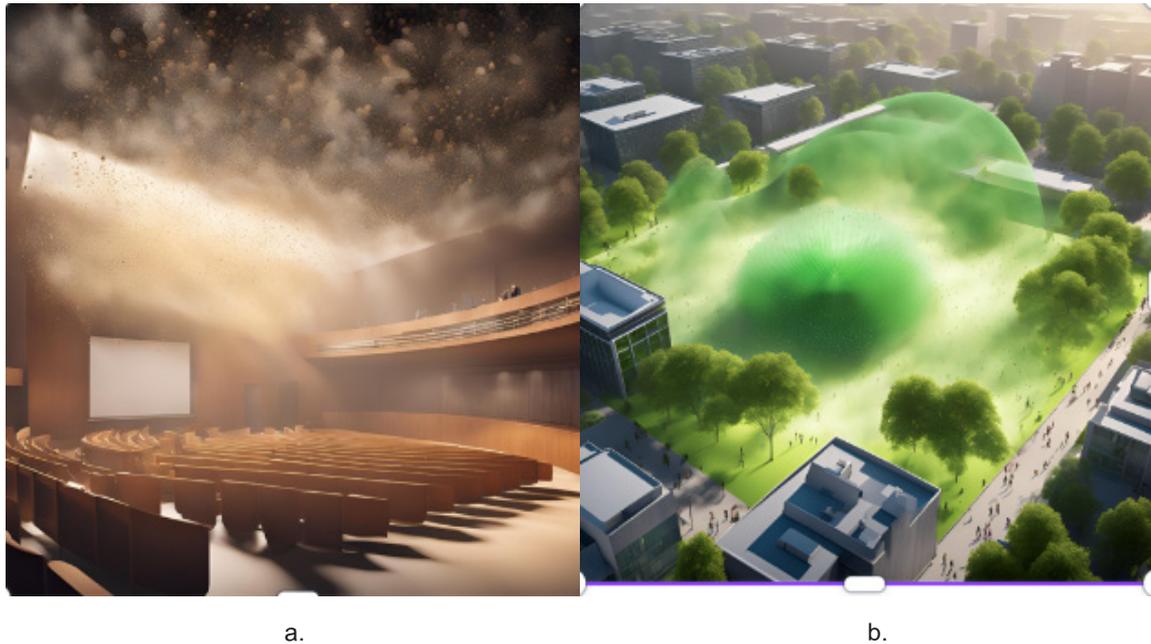


Figure 6 a. 3D spatial mapping of ambient particulate matter distribution in university area showing variation in concentrations across different zones, with green areas indicating low concentration levels and darker areas showing higher pollution concentrations. b. 3D spatial mapping of indoor particulate matter distribution in conference room space demonstrating the vertical and horizontal dispersion patterns of particles in an enclosed environment, highlighting the capability of LIDAR technology to monitor both outdoor and indoor air quality conditions

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

- การเปรียบเทียบข้อมูล: เปรียบเทียบค่า $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ที่ได้จาก LIDAR กับข้อมูลจากสถานีตรวจวัด และวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สถิติ เช่น สหสัมพันธ์ (Correlation) และการถดถอย (Regression)

- การวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงพื้นที่: สร้างแผนที่ความเข้มข้นของมลพิษในพื้นที่มหาวิทยาลัย และวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง

- การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระดับมลพิษ: วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับมลพิษกับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา และศึกษาผลกระทบของกิจกรรมในมหาวิทยาลัย ต่อระดับมลพิษ

- การประเมินประสิทธิภาพของ LIDAR ในมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่กึ่งเมืองกึ่งชนบทและมีพื้นที่สีเขียวกระจายตัว พบข้อดีที่โดดเด่นในการครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และติดตามการเปลี่ยนแปลงแบบ real-time แต่มีข้อจำกัดคือค่าที่วัดได้ต่ำกว่าวิธีมาตรฐาน 14-15% และความแม่นยำลดลงในสภาพอากาศแปรปรวน เมื่อเทียบกับงานวิจัยในเมืองใหญ่ที่มีสถานีตรวจวัดอ้างอิงหนาแน่นกว่า การศึกษานี้มีความโดดเด่นในการวิเคราะห์ผลกระทบของพื้นที่สีเขียวต่อการกระจายตัวของมลพิษในบริบทสถาบันการศึกษา ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาติดตามคุณภาพอากาศที่เหมาะสมกับพื้นที่ในระยะยาว

- การวิเคราะห์ทางสถิติ: ใช้ t-test และ ANOVA เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีการวัด และใช้การวิเคราะห์แนวโน้มเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

การวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดดำเนินการโดยใช้โปรแกรม R version 4.1.0 (R Core Team, 2021) และ MATLAB R2021a (MathWorks Inc., Natick, MA, USA)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการวัดมลพิษด้วยระบบ LIDAR ในพื้นที่มหาวิทยาลัย

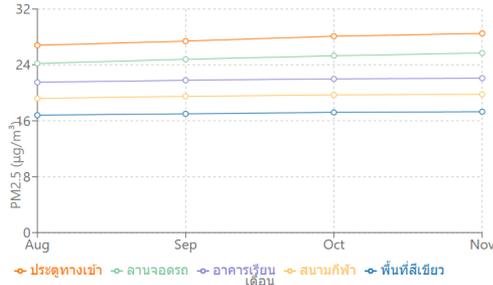
ระบบ LIDAR ได้ทำการวัดปริมาณ $PM_{2.5}$ และ PM_{10} ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ 5 จุดหลัก (Table 1)

Table 1 Average $PM_{2.5}$ and PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured by LIDAR system (24-hour average)

Measurement locations	$PM_{2.5}$	PM_{10}
main entrance gate	28.5 ± 3.2	52.3 ± 5.1
main parking area	25.7 ± 2.8	48.9 ± 4.7
main academic building	22.1 ± 2.5	41.6 ± 4.3
outdoor sports field	19.8 ± 2.3	37.2 ± 3.9
green area	17.3 ± 2.0	32.8 ± 3.5

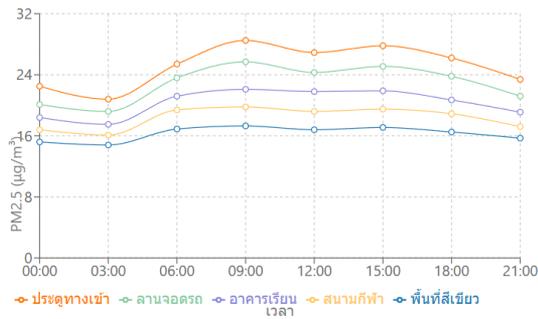
ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าบริเวณประตูทางเข้าหลักมีค่า PM_{2.5} และ PM₁₀ สูงที่สุด ในขณะที่พื้นที่สีเขียวมีค่าต่ำที่สุด

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงรายเดือน



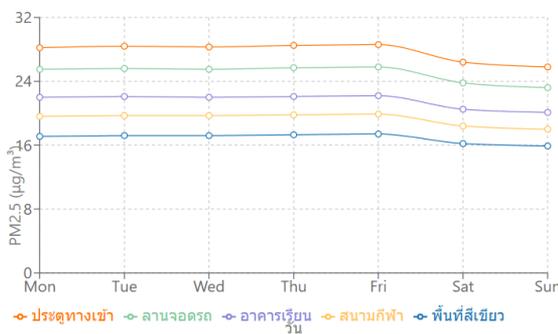
a.

การเปลี่ยนแปลงของ PM2.5 ตามช่วงเวลาของวัน



b.

การเปลี่ยนแปลงตามวันในสัปดาห์



c.

Figure 7 a. Changes in PM_{2.5} levels throughout different times of the day. b. Monthly trends. c. Daily variations throughout the week

เมื่อพิจารณารูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทั้งสองวิธีแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรายวันที่สอดคล้องกัน โดยพบค่าสูงสุดในช่วงเช้า (9:00 น.) และช่วงเย็น (15:00 น.) ส่วนแนวโน้มรายเดือนจากทั้งสองวิธีแสดงการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน โดยความแตกต่างระหว่างวิธีการวัดค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงเวลาการศึกษา (Figure 7)

การตรวจวัดด้วย LIDAR ในพื้นที่มหาวิทยาลัย พบความแตกต่างของระดับมลพิษระหว่างจุดต่าง ๆ โดยบริเวณประตูทางเข้ามีค่า PM_{2.5} สูงสุด (28.5 ± 3.2 µg/m³) และพื้นที่สีเขียวมีค่าต่ำสุด (17.3 ± 2.0 µg/m³) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการใช้พื้นที่และกิจกรรมในแต่ละบริเวณ

2. ผลการวัดมลพิษด้วยวิธีมาตรฐานในพื้นที่มหาวิทยาลัย

ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษที่ใกล้ที่สุดกับมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี (Table 2) (สำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดกาญจนบุรี, 2567)

Table 2 Average PM_{2.5} and PM₁₀ (µg/m³) from air quality monitoring stations (monthly average)

Months	PM _{2.5}	PM ₁₀
August	23.7 ± 4.1	45.2 ± 6.3
September	25.1 ± 4.3	47.8 ± 6.7
October	27.3 ± 4.6	51.5 ± 7.2
November	29.8 ± 5.0	56.2 ± 7.8

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสองวิธี

การเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างระบบ LIDAR และข้อมูลจากสถานีตรวจวัดแสดงดังนี้

Table 3 Comparative analysis of LIDAR system and air quality monitoring station measurements

Measurement method	PM _{2.5}	PM ₁₀
Correlation coefficient	0.92	0.89
LIDAR	3.8 ± 1.2	7.6 ± 1.8
Monitoring station	26.5 ± 4.5	50.2 ± 7.0
RMSE	2.8	4.2

Table 3 เปรียบเทียบผลระหว่างการตรวจวัดด้วยระบบ LIDAR และสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ พบว่าทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.92 สำหรับ PM_{2.5} และ 0.89 สำหรับ PM₁₀ อย่างไรก็ตาม พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองวิธี โดย LIDAR ให้ค่าต่ำกว่าประมาณ 3.8 ± 1.2 mg/m³ สำหรับ PM_{2.5} และ 7.6 ± 1.8 mg/m³ สำหรับ PM₁₀ โดยมีค่า RMSE อยู่ที่ 2.8 และ 4.2 mg/m³ ตามลำดับ

ความแตกต่างของค่าที่ตรวจวัดได้ระหว่างสองวิธีอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ตำแหน่งการติดตั้งสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ระยะห่างระหว่างจุดตรวจวัด และ

กิจกรรมในพื้นที่ โดยรวมแล้วผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของมลพิษทางอากาศ แม้จะมีค่าแตกต่างกันในเชิงปริมาณซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัยด้านตำแหน่งและสภาพแวดล้อมของจุดตรวจวัด ข้อมูลที่ได้จากทั้งสองวิธีจึงมีประโยชน์ในการติดตาม

คุณภาพอากาศและสามารถใช้เสริมกันในการวางแผนจัดการคุณภาพอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัยต่อไป

4. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอากาศในมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝุ่นละอองกับปัจจัยต่าง ๆ แสดงดังนี้

Table 4 Correlation coefficient (r) between particulate matter concentration and various factors

Factors	PM _{2.5}	p-value	PM ₁₀	p-value
temperature	0.35	<0.001**	0.32	<0.001**
relative humidity	-0.42	<0.001**	-0.39	<0.001**
wind speed	-0.58	<0.001**	-0.55	<0.001**
traffic volume	0.71	<0.001**	0.68	<0.001**
construction activities in the area	0.63	<0.001**	0.65	<0.001**

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝุ่นละอองกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและกิจกรรมในพื้นที่มหาวิทยาลัย (Table 4) พบว่าปริมาณการจราจรมีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงสุดกับปริมาณฝุ่นละออง ($r = 0.71$ สำหรับ PM_{2.5} และ $r = 0.68$ สำหรับ PM₁₀, $p < 0.001$) โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีการเดินทางเข้า-ออกมหาวิทยาลัยหนาแน่น ในขณะที่ความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงลบ ($r = -0.58$ สำหรับ PM_{2.5} และ $r = -0.55$ สำหรับ PM₁₀, $p < 0.001$) แสดงให้เห็นบทบาทของลมในการช่วยกระจายมลพิษ โดยเฉพาะในช่วงที่มีความเร็วลมสูงกว่า 2 เมตรต่อวินาที

การประเมินกิจกรรมก่อสร้างในพื้นที่ใช้ดัชนีรวมที่พิจารณาจากขนาดพื้นที่ก่อสร้าง จำนวนและประเภทเครื่องจักรที่ใช้งาน และระยะเวลาทำงานในแต่ละวัน ผลการ

วิเคราะห์พบความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณฝุ่นละออง ($r = 0.63$ สำหรับ PM_{2.5} และ $r = 0.65$ สำหรับ PM₁₀, $p < 0.001$) สำหรับปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา พบว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์เชิงบวกระดับปานกลาง ($r = 0.35$ สำหรับ PM_{2.5} และ $r = 0.32$ สำหรับ PM₁₀, $p < 0.01$) ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์เชิงลบระดับปานกลาง ($r = -0.42$ สำหรับ PM_{2.5} และ $r = -0.39$ สำหรับ PM₁₀, $p < 0.01$)

ข้อมูลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนมาตรการจัดการคุณภาพอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยเฉพาะการจัดการจราจรและการควบคุมกิจกรรมก่อสร้างในช่วงที่มีความเสี่ยงสูง

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

Table 5 t-test Analysis: LIDAR vs BAM-1020

Parameter (µg/m ³)	LIDAR (Mean ± SD)	BAM-1020 (Mean ± SD)	t-value	p-value	95% CI
PM _{2.5}	22.7 ± 2.6	26.5 ± 4.5	-3.842	0.0014*	[-5.82,-1.78]
PM _{2.5}	42.6 ± 4.3	50.2 ± 7.0	-4.156	0.0008*	[-11.25,-3.95]

*p < 0.05 แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Table 6 Analysis of Variance (ANOVA) between Sampling Points

Sources of Variance	df	SS	MS	F-value	p-value
PM_{2.5}					
Between groups	4	1524.63	381.16	42.85	< 0.0001*
Within groups	115	1022.75	8.89	-	-
Total	119	2547.38	-	-	-
PM₁₀					
Between groups	4	3865.92	966.48	38.72	< 0.0001*
Within groups	115	2869.83	24.95	-	-
Total	119	6735.75	-	-	-

df = degree of freedom, SS = sum of squares, MS = mean square

*p < 0.05 แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Table 5 (t-test analysis): พบว่า LIDAR วัดค่าได้ต่ำกว่า BAM-1020 อย่างมีนัยสำคัญ PM_{2.5}: LIDAR ต่ำกว่า ~14% (22.7 vs 26.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM₁₀: LIDAR ต่ำกว่า ~15% (42.6 vs 50.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) แสดงว่าต้องมีการปรับแก้ค่าที่วัดได้จาก LIDAR ก่อนนำไปใช้งานจริง

Table 6 (ANOVA): ยืนยันว่ามีความแตกต่างของระดับมลพิษระหว่างจุดต่าง ๆ ในมหาวิทยาลัยอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและลักษณะการใช้พื้นที่มีผลต่อระดับมลพิษ ข้อมูลนี้เป็นประโยชน์ในการวางแผนจัดการคุณภาพอากาศในแต่ละพื้นที่

ผลการวิเคราะห์ทั้งสองตารางนี้ชี้ให้เห็นว่า LIDAR สามารถใช้ตรวจวัดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องมีการปรับแก้ค่าและควรใช้ร่วมกับวิธีมาตรฐานเพื่อความแม่นยำสูงสุด

5. อภิปรายผล

การอภิปรายผลการวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ในการตรวจวัดและประเมินคุณภาพอากาศ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี มีประเด็นสำคัญที่ควรอภิปรายตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง LIDAR กับวิธีมาตรฐาน

ผลการศึกษาพบความสัมพันธ์ระดับสูงระหว่างค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.92 สำหรับ PM_{2.5} และ 0.89 สำหรับ PM₁₀ แสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของมลพิษได้สอดคล้องกัน การที่ค่าสหสัมพันธ์สูงกว่า 0.85 สอดคล้องกับเกณฑ์การยอมรับของ US EPA สำหรับวิธีการตรวจวัดคุณภาพอากาศทางเลือก อย่างไรก็ตาม พบว่าค่าที่วัดได้จาก LIDAR มีแนวโน้มต่ำกว่าสถานีตรวจวัดประมาณ 14-15% โดยมีค่า RMSE อยู่ที่ 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับ PM_{2.5} และ 4.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับ PM₁₀

ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัยประการแรก คือ ความแตกต่างของตำแหน่งและความสูงในการตรวจวัด โดย LIDAR ติดตั้งที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในขณะที่สถานีตรวจวัดอยู่ที่ความสูง 2-3 เมตร ซึ่งใกล้เคียงแหล่งกำเนิดมลพิษมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ McManamon (2019) ที่พบว่าความสูงในการตรวจวัดมีผลต่อค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง ประการที่สอง คือ ระยะห่างระหว่างจุดตรวจวัด ซึ่งอาจทำให้มวลอากาศที่ตรวจวัดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน และประการสุดท้าย คือ หลักการวัดที่ต่างกัน โดย LIDAR ใช้การกระเจิงของแสงเลเซอร์ในขณะที่สถานีตรวจวัดใช้หลักการดูดกลืนรังสีเบต้า

2. การกระจายตัวและปัจจัยที่มีผลต่อระดับมลพิษ การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของมลพิษแสดงรูปแบบที่ชัดเจน โดยพบความแตกต่างระหว่างจุดตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.001) บริเวณประตูทางเข้ามีค่า PM_{2.5} และ PM₁₀ สูงสุด (28.5 \pm 3.2 และ 52.3 \pm 5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และพื้นที่สีเขียวมีค่าต่ำสุด (17.3 \pm 2.0 และ 32.8 \pm 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ความแตกต่างนี้สะท้อนอิทธิพลของกิจกรรมและการใช้พื้นที่ การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลพบว่ามีปริมาณการจราจรมีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงสุด (r = 0.71, p < 0.001) โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน (7:00-9:00 น. และ 16:00-18:00 น.) ที่มีปริมาณรถยนต์เฉลี่ย 250-300 คันต่อชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu *et al.* (2022) ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจราจรกับ PM_{2.5} ในระดับใกล้เคียงกัน (r = 0.68-0.75)

ความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงลบ (r = -0.58, p < 0.001) โดยพบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทุก 1 เมตรต่อวินาที ค่า PM_{2.5} จะลดลงประมาณ 2.5-3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ แสดงบทบาทสำคัญของการระบายอากาศตามธรรมชาติ ซึ่ง Zeybek (2022) ได้อธิบายกลไกนี้ว่าเกิดจากการผสมผสานและการกระจายตัวของมลพิษในแนวดิ่ง

สำหรับกิจกรรมก่อสร้าง การประเมินใช้ดัชนีรวมที่พิจารณาจากพื้นที่ก่อสร้าง จำนวนและประเภทเครื่องจักร และระยะเวลาทำงาน พบความสัมพันธ์เชิงบวก ($r = 0.63$, $p < 0.001$) โดยเฉพาะในช่วงที่มีการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ และมีการเคลื่อนย้ายดิน

ปัจจัยด้านอนุภาคมวิทย์อื่น ๆ มีความสัมพันธ์ระดับปานกลาง โดยอนุภาคมีความสัมพันธ์เชิงบวก ($r = 0.35$, $p < 0.01$) อาจเกี่ยวข้องกับกำเริบความปั่นป่วนในแนวตั้ง ส่วนความชื้นสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์เชิงลบ ($r = -0.42$, $p < 0.01$) สอดคล้องกับทฤษฎีการตกตะกอนของอนุภาคในอากาศชื้น

3. แนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR

ผลการวิจัยนำไปสู่แนวทางการประยุกต์ใช้ LIDAR ในการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศดังนี้:

3.1 การเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ

- ติดตั้งระบบ LIDAR ในจุดยุทธศาสตร์ที่ครอบคลุมพื้นที่กิจกรรมหลัก

- สร้างฐานข้อมูลคุณภาพอากาศระยะยาว

3.2 การจัดการการจราจร

- ปรับเส้นทางและเวลาการเดินทางในชั่วโมงวิกฤต

- จัดโซนจอดรถให้ห่างจากอาคารเรียน

- ส่งเสริมการใช้รถสาธารณะและจักรยาน

3.3 การจัดการพื้นที่

- เพิ่มแนวกันชนพื้นที่สีเขียวระหว่างถนนกับอาคาร

- ออกแบบการไหลเวียนอากาศระหว่างอาคาร

- ควบคุมกิจกรรมก่อสร้างในช่วงที่มีความเสี่ยงสูง

ข้อจำกัดของการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคตได้อภิปรายไว้แล้วในส่วนก่อนหน้า โดยสรุปการวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของ LIDAR ในการสนับสนุนการจัดการคุณภาพอากาศในสถาบันการศึกษา แม้จะมีข้อจำกัดบางประการ แต่ข้อมูลที่ให้มีประโยชน์ต่อการพัฒนาแนวทางการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ในการตรวจวัดและประเมินคุณภาพอากาศ ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี แสดงให้เห็นประสิทธิภาพและข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน ผลการศึกษาพบความสัมพันธ์ระดับสูงระหว่างค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สห

สัมพันธ์ 0.92 สำหรับ $PM_{2.5}$ และ 0.89 สำหรับ PM_{10} ($p < 0.001$) แม้ว่าจะระบบ LIDAR จะให้ค่าต่ำกว่าวิธีมาตรฐานประมาณ 14-15% แต่มีข้อดีด้านการตรวจวัดต่อเนื่อง ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้าง และมีต้นทุนดำเนินการต่ำในระยะยาว โดยมีค่า RMSE 2.8 mg/m^3 สำหรับ $PM_{2.5}$ และ 4.2 mg/m^3 สำหรับ PM_{10}

การศึกษาการกระจายตัวของมลพิษในพื้นที่มหาวิทยาลัยแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ บริเวณประตูทางเข้ามีค่าสูงสุด ($PM_{2.5}$: 28.5 ± 3.2 , PM_{10} : 52.3 ± 5.1 mg/m^3) ในขณะที่พื้นที่สีเขียวมีค่าต่ำสุด ($PM_{2.5}$: 17.3 ± 2.0 , PM_{10} : 32.8 ± 3.5 mg/m^3) สะท้อนอิทธิพลของกิจกรรมและการใช้พื้นที่ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลพบว่ามีปริมาณการจราจรมีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงสุด ($r = 0.71$) โดยเฉพาะในช่วงเร่งด่วนที่มีปริมาณรถ 250-300 คันต่อชั่วโมง รองลงมาคือกิจกรรมก่อสร้าง ($r = 0.63$) ในขณะที่ความเร็วลมมีความสัมพันธ์เชิงลบ ($r = -0.58$) แสดงบทบาทในการช่วยกระจายมลพิษ โดยค่า $PM_{2.5}$ ลดลง 2.5-3.0 mg/m^3 ต่อความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น 1 เมตรต่อวินาที

ด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี LIDAR ในการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพอากาศ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นความเหมาะสมในการใช้ระบบนี้สำหรับการเฝ้าระวังต่อเนื่อง การพัฒนาระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ และการสร้างฐานข้อมูลระยะยาว ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการจัดการจราจร การวางผังพื้นที่สีเขียว และการควบคุมกิจกรรมก่อสร้างในช่วงที่มีความเสี่ยงสูง อย่างไรก็ตาม ควรใช้ระบบ LIDAR ร่วมกับวิธีมาตรฐานเพื่อเสริมข้อดีและลดข้อจำกัดของแต่ละระบบ โดยใช้ LIDAR สำหรับการเฝ้าระวังต่อเนื่องและใช้วิธีมาตรฐานในการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้อง เพื่อการพัฒนากระบวนการจัดการคุณภาพอากาศในสถาบันการศึกษาอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2566). รายงานสถานการณ์ฝุ่น $PM_{2.5}$ 2560-2566. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2024/06/pcdnew-2024-06-21_06-42-54_474054.pdf
- กลุ่มวิจัยวิทยาศาสตร์บรรยากาศ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2566). สดร.เผยข้อมูลคาดการณ์ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ล่วงหน้าจากเทคโนโลยีไลดาร์. สถาบันวิจัย

- ดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). <https://www.narit.or.th/index.php/news/1623-narit-pm-2-5-lidar>
- ัชชชก รัชชชกบางแหลม. (2564). ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของพื้นที่เมืองกับการเกิดมลพิษทางอากาศฝุ่น PM2.5 ในช่วง พ.ศ. 2553 - 2563 กรณีศึกษา: กรุงเทพมหานคร [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR).
- สำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดกาญจนบุรี. (2567). แผนเผชิญเหตุมลพิษจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก. <https://backofficeminisite.disaster.go.th/upload/userfiles/แผนเผชิญเหตุแก้ไขปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก%2065-66.pdf>
- Barauskas, D., Pelenis, D., Dzikaras, M., Vanagas, G., Mikolajunas, M., Baltrusaitis, J., & Virzonis, D. (2023). Highly selective capacitive micromachined ultrasonic transducer-based miniature gravimetric CO₂ sensor with in-situ calibration for relative humidity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 393, 134178. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134178>
- Bräuer, P., & D'Agostino, C. (2018). Base adsorption mechanism over zeolite catalysts at different Al contents probed by the tapered element oscillating microbalance (TEOM). *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(19), 13436–13445. <https://doi.org/10.1039/c8cp05001e>
- Butt, J., Oville, C., Sharma, N. C. P., & Barnes, J. E. (2018). Using a CCD camera lidar system for detection of Asian dust. *Proceedings of SPIE*, 10779, 107790Z. <https://doi.org/10.1117/12.2324551>
- Canton, H. (2021). World Health Organization—WHO. In *The Europa directory of international organizations 2021*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003179900-57>
- Gujrathi, A. (2021). How immunoprotein diagnostic testing has become beneficial to human body. *Clinical Medical Reviews and Reports*, 3(5). <https://doi.org/10.31579/2690-8794/080>
- Health Effects Institute. (2024, June 27). *New State of Global Air Report finds air pollution is second leading risk factor for death worldwide*. <https://www.health-effects.org/news-events/newsroom/news-releases/new-state-global-air-report-finds-air-pollution-second-leading>
- Huang, W. (2022). The update of World Health Organization air quality guidelines and its implications on health risk management in low- and middle-income countries. *Global Health Journal*, 6(1), 3–5. <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2022.01.004>
- Kim, H., Kim, J., & Roh, S. (2023). Effects of gas and steam humidity on particulate matter measurements obtained using light-scattering sensors. *Sensors*, 23(13), 6199. <https://doi.org/10.3390/s23136199>
- Korotcenkov, G. (2019). *Gravimetric humidity sensors* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22370-12>
- Liu, D., Dai, Y., Hou, Z., & Li, D. (2022). Optimized design for the core components of the oscillating balance dust measuring device. In *2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)* (pp. 278–282). IEEE.
- Luo, T., Wang, Z., Zhang, D., Liu, X., Wang, Y., & Yuan, R. (2015). Global dust distribution from improved thin dust layer detection using A-train satellite lidar observations. *Geophysical Research Letters*, 42(2), 620–628. <https://doi.org/10.1002/2014gl062111>
- McManamon, P. F. (2019). LiDAR receivers. In *LiDAR technologies and systems*. SPIE Press.
- Mifsud, M. D., Sant, T., & Farrugia, R. N. (2018). A comparison of measure-correlate-predict methodologies using LiDAR as a candidate site measurement device for the Mediterranean Island of Malta. *Renewable Energy*, 127, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.02>
- Nations, U. (2017). Sustainable Development Goal 3: Good health and well-being. *Africa Sustainable Development Report*, 45–63. <https://doi.org/10.18356/8f3d4aea-en>
- Okubo, K., Lagrosas, N., & Shiina, T. (2023). Dust flow distribution measurement by low coherence Doppler lidar. In *Springer atmospheric sciences* (pp. 143–155). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37818-8_10

- Pedelacq, M. E., Garaffo, G., Llanos, E., Venturini, N., & Muniz, P. (2022). Pollution has negative effects on macrozoobenthic trait diversity in a large subtropical estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114101. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114101>
- Seigneur, C. (2019). Air pollution meteorology. In *Air pollution: Concepts, theory, and applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108674614.004>
- Shukla, K., & Aggarwal, S. G. (2022). A technical overview on beta-attenuation method for the monitoring of particulate matter in ambient air. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(8), 220195. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220195>

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt.** ตัวหนา

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **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 และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

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

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

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

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

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

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

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

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

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

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

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

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

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

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

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

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

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

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

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

ตัวอย่าง:

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

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

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

ตัวอย่าง:

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

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

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

Instruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

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

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Aim and Scope:

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

Ownership

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

Advisors

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

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

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

Editorial Board

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

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

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Janloy
Jirarat Puseerit

Six issues per year

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

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 45 ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์ 2569

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

