

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 43 Number 6 November - December 2024

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/โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา

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

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมพรพรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิชา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิญญ์ 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 ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน กูวรรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกสัชกร ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Dr.Adrian Roderick Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัทรวีไล รุ่งวิสัย
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

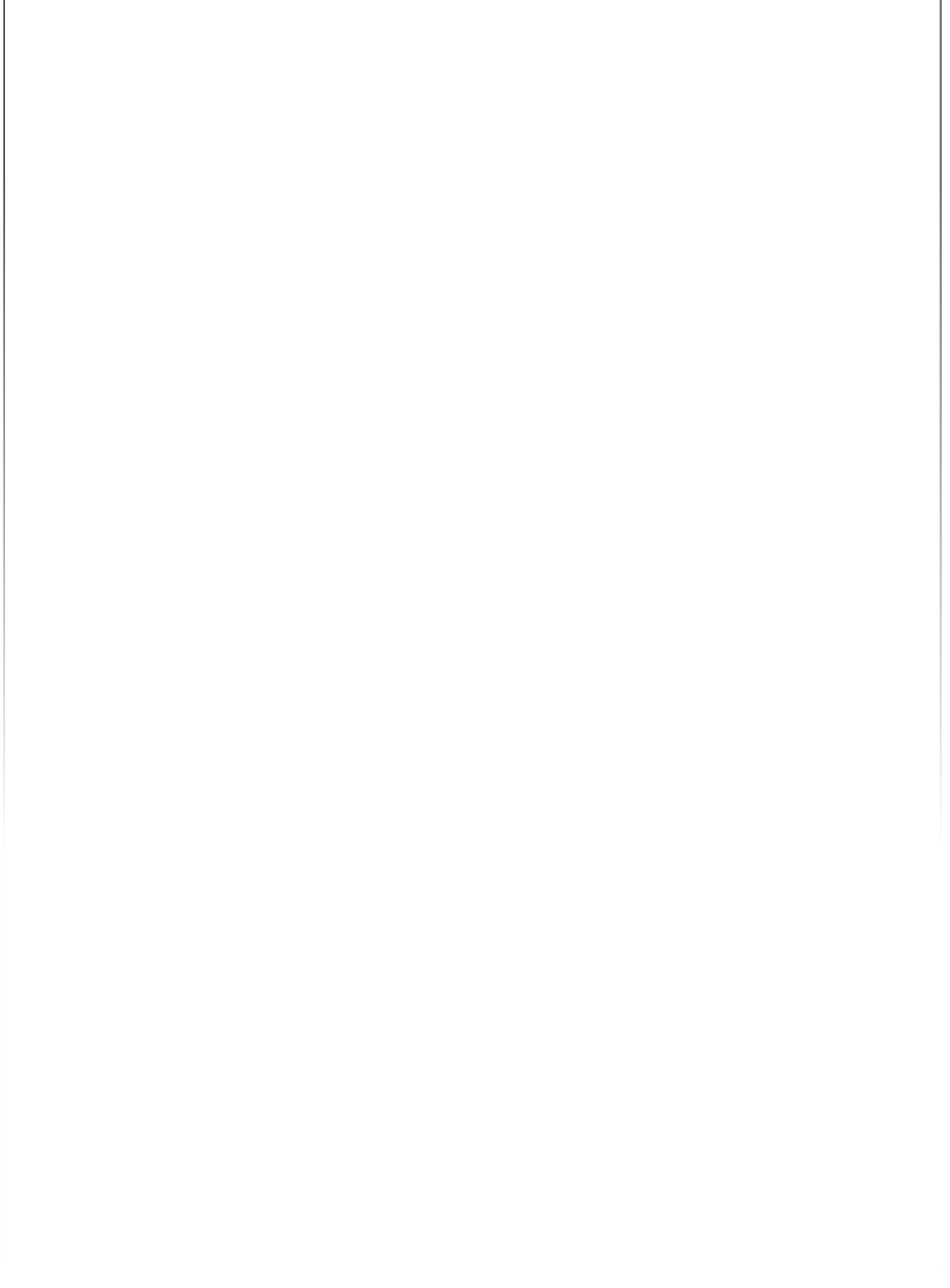
บทบรรณาธิการ

สวัสดีครับท่านผู้อ่านวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่าน ปี พ.ศ. 2567 กำลังดำเนินเข้าสู่ช่วงปลายปี ซึ่งในรอบปีที่ผ่านมามีประเด็นที่เป็นกระแสในสังคมของเราอย่างหลากหลาย หนึ่งในหัวข้อที่สร้างความตื่นตัวให้สังคมอย่างมาก คือ การแพร่ระบาดของปลาหมอหางดำ ซึ่งจัดว่าเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่น ที่ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยแล้วแพร่ระบาดไปยังแหล่งน้ำต่างๆ จากความสามารถในการปรับตัวเพื่ออยู่อาศัยในแหล่งน้ำที่อย่างหลากหลาย ทำให้เกิดความกังวลว่าจะส่งผลกระทบต่อชนิดพันธุ์พื้นเมืองที่อยู่ในแหล่งอาศัยเดียวกับปลาหมอหางดำ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยอย่างเป็นระบบเพื่อทราบถึงผลกระทบในด้านต่างๆ ของการแพร่ระบาดของปลาหมอหางดำต่อไป

สำหรับภาพหน้าปกของวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับนี้ ขอเสนอประเด็นที่เกี่ยวข้องกับชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยและแพร่ระบาดไปยังพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ คือ หอยเชอรี่ ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Pomacea canaliculata* (Lamarck, 1819) มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมในแถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยเมื่อกว่า 40 ปี ที่ผ่านมา และแพร่กระจายไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ทำให้เกิดความกังวลอย่างมากถึงผลกระทบทั้งต่อการเกษตรกรรม เช่น การทำลายต้นข้าว หรือการแก่งแย่งทรัพยากรกับหอยชนิดพันธุ์ดั้งเดิมของประเทศไทยที่จะนำไปสู่ผลกระทบต่อระบบนิเวศในภาพรวมต่อไป

อย่างไรก็ดี ในปัจจุบัน จากภาพของชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่อาจส่งผลกระทบและสร้างปัญหาในหลากหลายมิติ หอยเชอรี่ได้กลายเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีการเพาะเลี้ยงเพื่อจำหน่ายอย่างแพร่หลาย จากความนิยมในการบริโภคเนื้อของหอยชนิดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประชาชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งบทบาทจาก “ผู้ร้าย” กลายเป็น “พระเอก” นี้ ทำให้หลายภาคส่วนที่เกี่ยวข้องอาจมองข้ามถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในด้านต่างๆ ทำให้หยุดชะงักสำหรับการศึกษาวิจัยในประเด็นเหล่านี้ไป ดังนั้นจึงควรสนับสนุนหรือส่งเสริมให้มีการศึกษาวิจัย ติดตามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นแล้ว เพื่อให้เข้าใจอย่างถ่องแท้และใช้ประโยชน์ทรัพยากรชีวภาพอย่างสมดุล เพื่อความยั่งยืนต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
กองบรรณาธิการ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



สารบัญ

Biological Science

- การศึกษา *Streptomyces* sp. WPN31 ที่แยกได้จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม: การสร้างเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลานเนส และการตรวจสอบคุณสมบัติการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม 413
The study of *Streptomyces* sp. WPN31 isolated from the rhizosphere of pandanus palm: Amylase, cellulase, and xylanase production, and investigation of antibiofilm properties
วรรณิกา ปะนา, พงศกร กันทะ, นภัสสร สันตะพันธ์, วิศรุต ศรีศักดิ์วารังกูร และ นาวรัตน์ นันทพงษ์
Wannika Pana, Phongsakorn Ganta, Napatsorn Santapan, Wissarut Srisakvarangkool and Nawarat Nantapong

- ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรากฏขึ้นของไมคอร์ไรซา และเห็ดกินได้ของวงศ์ตีนเป็ดเทอโรคาร์เปซีย ในจังหวัดสุรินทร์ 424
The environmental factors that effected to the occurrences of wild mycorrhiza and edible mushroom of Dipterocarpaceae in Surin province
ชวนพิศ จารัตน์, ยุกเพยาว โตเคอรี่, ฐิตาภรณ์ นิลวรรณ, พรพรรณนิการ์ กงจักร, อำนวย วัฒนกรสิริ และ ไสว คณาเสน
Chuanpit Jarat, Yuppayao Tokeeree, Thitaporn Nnlawan, Phannika Kongjuk, Amnuay Wattanakornsiri and Sawai Kanasen

Chemistry

- เทคนิคการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นในตัวอย่างกาแฟโดยเครื่องสกัดด้วยเฟสของแข็งอัตโนมัติ 433
Sample preparation techniques for the determination of short-chain organic acids in coffee samples by the automated solid-phase extractor
ณัฐนรี รัตนคันทรง, กานต์ริดา คงแทน, พิสมัย ปิ่นศรีทอง, รุสนี กุลวิจิตร และ ศักดิ์ชัยบดี ปิ่นศรีทอง
Natnaree Rattanakunsong, Kantida Kongtan, Pisamai Pinsrithong Roosanee Kulvijitra and Sakchaibordee Pinsrithong

Computer and Information Technology

- การพัฒนาาระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ 445
Development of the recommendation system for the selection of major in Information and Communication Technology using decision tree techniques
วงกต ศรีอุไร, อนุสรณ์ บันเทิง และ คมกฤษณ์ มุธาพร
Wongkot Sriurai, Anusorn Bunteong and Komkrit Mutaporn

- การวิเคราะห์ตระกร้าตลาดโดยใช้กฎความสัมพันธ์และแอปพลิเคชันการใช้งาน 455
Market basket analysis using association rule mining and its applications
ศิริลักษณ์ แก้วศิริรุ่ง, ขนิษฐา หอมจันทร์, วรวิทย์ ฝั้นคำอ้าย, กัญญ์ณพัชญ์ พลเยี่ยม, จักรี ม่วงสาร, วรารุช วิสมกา และ นงนุช เกตุย
Sirilux Kaewsirirung, Kanitha Homjun, Worawit Fankam-ai, Kannapat Polyiam, Jakkrit Muangsang, Warawut Wisomka and Nongnuch Ketui

- การสร้างลาเบลสังเคราะห์สำหรับการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมผ่านการเรียนรู้แบบมีผู้สอนด้วยการแทนค่าด้วยตัวเอง 464
Generating synthetic labels for satellite image classification through self-supervised representation learning
ศรัณย์ กุลยานนท์, วสิศ ลิ้มประเสริฐ, ปกป้อง ส่องเมือง และ รัชฎา คงคะจันทร์
Sarun Gulyanon, Wasit Limprasert, Pokpong Songmuang and Rachada Kongkachandra

Engineering

- การออกแบบและจัดสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์จากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซี สำหรับพืชกระท่อม (*Mitragyna speciosa* Korth.) 473
Design and construction of automatic solar irrigation system based on soil moisture using PLC for kratom (*Mitragyna speciosa* Korth.)
องอาจ ทับบุรี และ กัญยรัตน์ เอกเอี่ยม
Ong-art Tubburee and Kanyarat Ek-iam

Physical Science

- การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน 485
Depletion of solar radiation due to particulate matter with diameter of less than 2.5 micron
สุมาบาลย์ บรรเทิง, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, เสริม จันทร์ฉาย และ Sheng-Hsiang Wang
Sumaman Buntoung, Somjet Pattarapanitchai, Serm Janjai and Sheng-Hsiang Wang

การศึกษา *Streptomyces* sp. WPN31 ที่แยกได้จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม (*Pandanus amaryllifolius*): การสร้างเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลานเนส และการตรวจสอบคุณสมบัติการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม

The study of *Streptomyces* sp. WPN31 isolated from the rhizosphere of pandanus palm: Amylase, cellulase, and xylanase production, and investigation of antibiofilm properties

วรรณิกา ปะนา¹, พงศกร กันทะ¹, นภัสสร สันตะพันธ์¹, วิศรุต ศรีศักดิ์วารังกูร¹ และ นวรัตน์ นันทพงษ์^{1*}
Wannika Pana¹, Phongsakorn Ganta¹, Napatsorn Santapan¹, Wissarut Srisakvarangkool¹
and Nawarat Nantapong^{1*}

Received: 1 September 2023 ; Revised: 2 January 2024 ; Accepted: 15 January 2024

บทคัดย่อ

ไบโอฟิล์มเป็นสารที่ซับซ้อน ซึ่งหลั่งออกมาจากเชื้อจุลินทรีย์และสามารถเกาะติดกับพื้นผิวได้ ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม โรงงานอุตสาหกรรม และอุปกรณ์ทางการแพทย์ และยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดื้อยาปฏิชีวนะของเชื้อจุลินทรีย์ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความสามารถของเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 ที่แยกได้จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม ในการสร้างเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลานเนส และการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรียก่อโรค โดยผลของยีน *16S rRNA* พบว่า WPN31 มีความคล้ายคลึงกับ *Streptomyces griseicoloratus* (ร้อยละ 98.90) มากที่สุด ซึ่งเป็น streptomycetes สปีชีส์ใหม่ที่แยกได้จากดินในไร่ฝ้าย สาธารณรัฐประชาชนจีน อย่างไรก็ตาม พบว่า *Streptomyces* sp. WPN31 มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์นอกเซลล์ ได้แก่ เอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลานเนส ได้ที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส และจากการประเมินการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* โดยใช้สารส่วนเหนือตะกอนของ WPN31 พบว่า ส่วนเหนือตะกอนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสร้างไบโอฟิล์มของ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* ดังนั้น การศึกษานี้จึงเป็นการรายงานเบื้องต้นเกี่ยวกับฤทธิ์ในการยับยั้งไบโอฟิล์มของ *Streptomyces* sp. WPN31 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลายได้

คำสำคัญ: ดินบริเวณรากพืช, *Streptomyces*, การยับยั้งไบโอฟิล์ม, เอนไซม์นอกเซลล์

Abstract

Biofilms are complex substances secreted by microorganisms, capable of adhering to various surfaces, leading to contamination of living tissues, environments, industrial settings, and medical equipment. They play a significant role in the emergence of antibiotic-resistant bacteria. This study aimed to evaluate the production of the enzymes amylase, cellulase, and xylanase, as well as the antibiofilm activity against pathogenic bacteria of *Streptomyces* sp. WPN31, isolated from the rhizosphere of pandanus palm (*Pandanus amaryllifolius*). Based on the *16S rRNA* results, WPN31 exhibited the highest similarity to *Streptomyces griseicoloratus* (98.80%), a novel streptomycete isolated from soil in cotton fields of China. However, *Streptomyces* sp. WPN31 was able to produce extracellular enzymes, including amylase, cellulase, and xylanase, at both 37 °C and 40 °C. The evaluation of biofilm inhibition using WPN31 supernatant revealed its ability to prevent biofilm formation in both *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*. Therefore, this study represents the initial report on the antibiofilm activity of *Streptomyces* sp. WPN31, suggesting its potential application in various industries.

Keywords: Rhizosphere, *Streptomyces*, Antibiofilm, Extracellular enzymes

¹ สาขาวิชาปรสิตวิทยา สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา, 30000, ประเทศไทย

¹ School of Preclinical Sciences, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

* Corresponding author; Nawarat Nantapong: nawarat@sut.ac.th

บทนำ

จุลินทรีย์บริเวณรากพืช (rhizosphere microorganisms) คือ จุลินทรีย์ที่แยกได้จากดินบริเวณรอบรากพืชหรือส่วนของดินที่สัมผัสกับรากพืช ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดและอยู่ร่วมกับพืช (Li *et al.*, 2022) จึงเป็นบริเวณของดินที่มีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูงกว่าบริเวณอื่นๆ กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญและเป็นกลุ่มใหญ่ที่สุด คือ จีโนส *Streptomyces* ซึ่งจุลินทรีย์บริเวณรากพืชมีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืช โดยมีส่วนช่วยในการพัฒนาพืช กระตุ้นให้มีความต้านทานโรคพืช และทนต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อมได้ (Mendes *et al.*, 2018; Newitt *et al.*, 2019)

จีโนส *Streptomyces* เป็นแอคติโนมัยซีตที่เรียที่ใหญ่ที่สุดในออเดอร์ *Actinomycetales* และแฟมิลี *Streptomycetaceae* ซึ่ง *Streptomyces* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ต้องการออกซิเจน มีปริมาณเบส GC ใน DNA ประมาณร้อยละ 69-78 และสามารถสร้างเส้นใยได้โดยทั่วไป *Streptomyces* มีแหล่งที่อยู่อาศัยที่หลากหลาย เช่น ทะเลทราย ทะเล พืช แมลง น้ำแข็ง และดิน (Donald *et al.*, 2022) *Streptomyces* มีบทบาทในการหมุนเวียนของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ เป็นแหล่งผลิตเอนไซม์นอกเซลล์ และสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) ที่เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้อย่างหลากหลาย (Chater, 2016; Olanrewaju & Babalola, 2019) ในปัจจุบันการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างเกินความจำเป็นและไม่ถูกต้องก่อให้เกิดปัญหา การเกิดขึ้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะแบบเก่า ทำให้เกิดความล้มเหลวในการรักษาโรคติดเชื้อ (Chanvatik *et al.*, 2019; Pumtong *et al.*, 2020) รวมถึงความสามารถที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถสร้างไบโอฟิล์มก็จัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เชื้อมีความต้านทานต่อยาปฏิชีวนะ (Sharma *et al.*, 2019)

แบคทีเรียก่อโรคหลายชนิดมีความสามารถในการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มกับเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์อื่นได้ และมีความสามารถในการสร้าง Extracellular Polymeric Matrix (EPS) เรียกว่าไบโอฟิล์ม (Leetanasaksakul & Thamchaipenet, 2018) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน และกรดนิวคลีอิก โดยองค์ประกอบและปริมาณของไบโอฟิล์มแต่ละชนิดจะแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ สภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย อุณหภูมิ ความเป็นกรดเบส (pH) ระดับออกซิเจน ระดับไนโตรเจน อายุของไบโอฟิล์ม และปริมาณของสารอาหาร (Alotaibi, 2021; Srinivasan *et al.*, 2021)

การก่อตัวของไบโอฟิล์ม สามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวของสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต เช่น บนพื้นผิวอุปกรณ์ครัวเรือนในห้องน้ำ อ่างล้างหน้า และท่อส่งน้ำ รวมถึงในด้านการแพทย์ ไบโอฟิล์มสามารถก่อตัวได้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์สำหรับ

การปลูกถ่ายอวัยวะ เช่น ลิ้นหัวใจเทียม สายสวน เครื่องกระตุ้นหัวใจ และข้อต่อเทียม (Balasubramanian *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคเยื่อหุ้มหัวใจอักเสบ กระดูกอักเสบ โรคหูน้ำหนวกอักเสบเรื้อรัง แผลในทางเดินอาหาร การติดเชื้อในปอดเรื้อรัง และการติดเชื้อในระบบทางเดินปัสสาวะ (Oberoi *et al.*, 2020) เชื้อแบคทีเรียก่อโรคสำคัญที่สร้างไบโอฟิล์มได้ เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถก่อโรคในมนุษย์ได้ (Vestby *et al.*, 2020) และแม้จะมีการใช้วิธีที่หลากหลายในการควบคุมและยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม แต่ก็ยังคงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถกำจัดไบโอฟิล์มให้หมดได้ เมื่อแบคทีเรียก่อโรคอยู่ในสภาวะที่มีการสร้างไบโอฟิล์ม แบคทีเรียก่อโรคจะมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมภายนอกที่ไม่เหมาะสม เช่น ยาปฏิชีวนะ สารเคมี และยาฆ่าเชื้อ (Srinivasan *et al.*, 2021)

มีการศึกษาเชื้อในกลุ่ม actinomycetes ที่มีความสามารถในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มในเชื้อแบคทีเรียก่อโรค เช่น *Actinomycete* TRM 46200, TRM 41337 และ TRM 46814 สามารถยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อ *Staphylococcus epidermidis* โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของเชื้อที่อยู่ในสภาวะลอยไปมาอย่างอิสระ (planktonic cells) (Xie *et al.*, 2019) สารสกัดที่ได้จากเชื้อ *Streptomyces viridochromogene* NBRC 3113 และ *Streptomyces levis* NRRL B-16370 สามารถยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อ *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus* และ *Enterobacter* (Oberoi *et al.*, 2020) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้เอนไซม์ชนิดต่างๆ มาช่วยในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม โดยมีรายงานการศึกษาการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและไซลาลเนส ในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *P. aeruginosa* (Kamali *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2018) และโครงสร้างของไบโอฟิล์มสามารถถูกทำลายได้จากเอนไซม์อะไมเลสและโปรตีเอส (Solihin *et al.*, 2021) และเนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้เอนไซม์ จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการควบคุมหรือทำลายไบโอฟิล์ม (Y. Li *et al.*, 2022; Solihin *et al.*, 2021) ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาเอนไซม์นอกเซลล์ ได้แก่ เอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลาลเนส จากเชื้อจุลินทรีย์และนำไปตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ใหม่ของ *Streptomyces* sp. WPN31 ที่แยกได้จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม และตรวจสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลาลเนส และการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค *S. aureus* และ *P. aeruginosa*

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. แบคทีเรียก่อโรค

เชื้อที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถของ *Streptomyces* sp. WPN31 ในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม คือ *S. aureus* ATCC29213 ที่ได้รับจาก American Type Culture Collection (ATCC) และ *P. aeruginosa* TISTR1287 ที่ได้รับจาก สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

2. การแยกเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 จากดิน

Streptomyces sp. WPN31 ถูกแยกมาจากการสุ่มเก็บตัวอย่างดินบริเวณรากต้นเตยหอมจากสวนพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยเก็บตัวอย่างที่อยู่ลึกลงไปจากผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร นำแต่ ละตัวอย่างดิน จำนวน 1 กรัม ละลายลงในน้ำเกลือปลอดเชื้อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.85 ปริมาตร 99 มิลลิลิตร และทำการเจือจางสารละลายครั้งละ 10 เท่าของสารละลายเดิม (10-fold serial dilution) นำระดับความเจือจาง (10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5}) ที่ต้องการ มาทำให้เชื้อกระจายตัว (spread plate) โดยนำสารละลายเชื้อ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ปล่อยลงบนอาหารแข็ง International *Streptomyces* Project 2 (ISP2) ที่ประกอบด้วย สารสกัดจากยีสต์ (yeast extract) สารสกัดจากมอลต์ (malt extract) และน้ำตาลเดกซ์โทรส (dextrose) ทำการบ่มจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ประมาณ 7-10 วัน จากนั้นจึงแยกโคโลนีเดี่ยวของเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 ให้บริสุทธิ์ โดยย้ายเชื้อลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ ISP2 agar อีกครั้ง (Tan *et al.*, 2018) เมื่อได้เชื้อที่บริสุทธิ์แล้วจึงทำการเก็บรักษาใน glycerol ร้อยละ 40 ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส สำหรับ การศึกษาในอนาคต

3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *Streptomyces* sp. WPN31

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยการเลี้ยง *Streptomyces* sp. WPN31 บนอาหารแข็ง ISP2 เป็นเวลา 14 วัน จากนั้นสังเกตและบันทึกข้อมูลของลักษณะเส้นใย สีของโคโลนี การสร้างเม็ดสี และพื้นผิวของโคโลนี

4. การระบุสายพันธุ์ด้วยการหาลำดับเบสของยีน *16S rRNA*

4.1 การเตรียมแม่แบบ DNA

เพาะเลี้ยง *Streptomyces* sp. WPN31 ในอาหารเหลว ISP2 เป็นเวลา 3 วัน จากนั้น นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนของเหลวด้านบน ออก ทำการเก็บกลุ่มเซลล์ที่ตกตะกอนอยู่ที่ด้านล่างของหลอด นำกลุ่มเซลล์ไปบดให้แตกโดยใช้ lysis buffer ปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นย้ายส่วนของสารแขวนลอยไปยังหลอดใหม่

และเติม 5M NaCl ปริมาตร 165 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน และนำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที ส่วนของเหลวเหนือตะกอนจะถูกย้ายไปยังหลอดใหม่ และเติม chloroform:isoamyl alcohol ในอัตราส่วน 1:1 ผสม สารแขวนลอยจนกระทั่งสารละลายกลายเป็นสีนํ้านม นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที ย้ายสารแขวนลอยชั้นบนไปยังหลอดใหม่และเติม chloroform ในอัตราส่วนที่เท่ากับสารแขวนลอย ผสมให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที ส่วนของสารแขวนลอยที่มีจีโนมดีเอ็นเอจะถูกย้ายไปยังหลอดใหม่และถูกตกตะกอนด้วย ethanol ร้อยละ 95 โดยบ่มที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ล้างจีโนมดีเอ็นเอด้วย alcohol ร้อยละ 75 และละลายจีโนมดีเอ็นเอในน้ำที่ปราศจากนิวคลีเอส และใช้เป็นแม่แบบดีเอ็นเอสำหรับการเพิ่มจำนวนยีน *16S rRNA*

4.2 การเพิ่มจำนวนยีน *16S rRNA* ด้วยวิธี PCR

จีโนมดีเอ็นเอจะถูกใช้เป็นแม่แบบสำหรับการทำ Polymerase chain reaction (PCR) ของยีน *16S rRNA* โดยใช้ไพรเมอร์ 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') และ 1525R (5'-AAGGAGGTGWTCCARCC-3') โดยมีเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาภายในเครื่อง thermal cycler ดังนี้: initial denaturation ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วย 25 รอบ ของ denaturation ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาที annealing ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที, extension ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที และ final extension ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ของ PCR โดยวิธี gel electrophoresis และทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ชุดสกัด FavoritePrep™ GEL/PCR (Favorgen Biotech, Taiwan) (Chanhasena *et al.*, 2022)

4.3 การวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน *16S rRNA* และการสร้างต้นไม้วิวัฒนาการ

ยีน *16S rRNA* บริสุทธิ์จะถูกนำไปวิเคราะห์ลำดับเบสที่บริษัท ACTG จำกัด (ประเทศไทย) และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบลำดับเบสกับฐานข้อมูลผ่านเว็บไซต์ EzBiocloud (<https://www.ezbiocloud.net/>) โดยใช้ BLAST program จากนั้นนำข้อมูลที่ไปจัดลำดับตามตำแหน่งที่คล้ายคลึงกันของลำดับเบสของสายพันธุ์ที่มีความใกล้เคียงกันจาก EzBiocloud โดยการใช้เมนู CLUSTAL W และสร้างต้นไม้สายวิวัฒนาการโดยใช้ซอฟต์แวร์ MEGA เวอร์ชัน 11 โดยประเมินระดับความเชื่อมั่นโดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติและสร้างค่าสนับสนุน (bootstap value) ที่ 1000 ซ้ำ

5. การทดสอบความสามารถในการสร้างเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลาเนส

เพาะเลี้ยง *Streptomyces* sp. WPN31 แบบการลงเชื้อตำแหน่งเดียว (point inoculation) บนอาหารแข็งที่เติมแหล่งคาร์บอนหลักชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส หรือไซแลน เพื่อทดสอบความสามารถของเชื้อในการใช้แหล่งคาร์บอนเหล่านี้ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นตรวจสอบความสามารถในการสร้างเอนไซม์ที่ขับออกนอกเซลล์และย่อยสลายแหล่งคาร์บอนในอาหารแข็ง จะสังเกตได้จากการสร้างบริเวณใส (clear zone) หลังจากการหยดสารละลายไอโอดีนลงบนอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้ง และหยดสี congo red ลงบนอาหารที่มีส่วนประกอบของไซแลนและเซลลูโลส (de Veras *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2019; Viswanathan & Rebecca, 2019) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใสที่ *Streptomyces* sp. WPN31 สร้างขึ้นและขนาดของโคโลนีและบันทึกผลการทดลอง

6. การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม

6.1 การเตรียมส่วนเหนือตะกอน (supernatant)

เพาะเลี้ยง *Streptomyces* sp. WPN31 ในอาหารเหลว ISP2 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 9,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.1 (WhatmanTM, GE Healthcare, UK) เพื่อกำจัดส่วนของตะกอนเซลล์ (cell pellet) และนำส่วนเหนือตะกอนไปใช้ในการศึกษาต่อไป

6.2 การทดสอบการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค

การศึกษานี้ใช้ส่วนเหนือตะกอนที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 ในการทดสอบการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค *S. aureus* และ *P. aeruginosa* โดยเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียก่อโรค ในอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง Mueller Hinton (MH) ที่ประกอบด้วย สารสกัดจากเนื้อ (beef extract) เคซีนไฮโดรไลสเสต (casein hydrolysate) และแป้ง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-20 ชั่วโมง นำเชื้อแบคทีเรียไปเจือจางให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 McFarland ก่อนจะนำไปใช้ในการทดสอบ โดยผสมสารละลายเชื้อแบคทีเรียกับส่วนเหนือตะกอน ในอัตราส่วน 1:1 ในเพลท 96 หลุม (96 well plate) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการบ่ม สารละลายในเพลท 96 หลุมจะถูกเทออกและล้างด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้แห้งก่อนที่จะย้อมด้วยสี crystal violet ร้อยละ 0.4 โดยนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-20 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้แห้ง จะนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร (A595) โดยการหยด ethanol ร้อยละ 95 เพื่อชะสีที่ติดอยู่กับเซลล์แบคทีเรียออกมา บันทึกค่าการดูดกลืนแสงและนำไปคำนวณค่าร้อยละของการสร้างไบโอฟิล์ม (Leetanasaksakul & Thamchaipenet, 2018) ตามสมการต่อไปนี้

ร้อยละการสร้างไบโอฟิล์ม =

$$\frac{A595 \text{ หลุมควบคุม} - A595 \text{ หลุมทดสอบ}}{A595 \text{ หลุมควบคุม}} \times 100$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การแยกเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม

เชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ถูกแยกได้จากดินบริเวณรากต้นเตยหอม (*Pandanus amaryllifolius*) จากสวนพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยต้นเตยหอมเป็นพืชเมืองร้อน ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นสีจากธรรมชาติ แต่งกลิ่น และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา (Lomthong *et al.*, 2022) เชื้อจุลินทรีย์บริเวณรากพืชมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการเจริญของพืช การควบคุมโรคพืช และช่วยรักษาสมดุลของระบบนิเวศ ทางเภสัช (Y. Li *et al.*, 2022) มีรายงานเกี่ยวกับการแยกเชื้อในจีนัส *Streptomyces* บริเวณรากพืชที่สามารถสร้างสารต้านจุลชีพหรือสร้างฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญของพืช เช่น การแยกเชื้อจากต้น *Artemisia herba-alba* ซึ่งสามารถผลิตสารต้านเชื้อรา (antifungal) สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) (Djemouai *et al.*, 2022) หรือสารช่วยส่งเสริมการเจริญของถั่วเขียว และสารต้านเชื้อรา *Phytophthora palmivora* (Nonthakaew *et al.*, 2022) และยังมีรายงานการค้นพบเชื้อจุลินทรีย์ที่แยกได้จากดินบริเวณที่ปลูกต้นเตยหอมที่สามารถสร้างสารต้านเชื้อราได้ (Khamna *et al.*, 2009) เป็นต้น

ในการแยกเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 จากดินบริเวณรากพืช จะใช้อาหาร ISP2 สำหรับการเลี้ยงเชื้อและแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ โดยทำการเลือกโคโลนีของ streptomycetes ตามลักษณะสัณฐานวิทยาที่บรรยายในหนังสือ Bergey's Manual of determinative bacteriology (Holt *et al.*, 1994) ได้แก่ โคโลนีมีลักษณะแข็ง ผึ่งตัวลงไปในชั้นอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง ผิวหน้าแห้งแตก มีรอยย่นหรือมีขุยฟูที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้เชื้อในกลุ่ม *Streptomyces* ยังมีลักษณะการพัฒนาของโคโลนีที่ช้า มีความต้องการออกซิเจน สร้างสปอร์ สร้างเส้นใยที่สัมผัสอากาศ (aerial mycelium) และเส้นใยที่เจริญเข้าไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ (substrate mycelium) มีสีแตกต่างกัน รวมถึงความสามารถในการผลิตเมดิซินีต่างๆ

ทั้งยังสามารถผลิตสารที่ชื่อว่า Geosmin ซึ่งเป็นกลิ่นไอดินที่เป็นลักษณะที่สำคัญของเชื้อในจีนัส *Streptomyces* (Alam *et al.*, 2022) หลังจากทำการเลือกโคโลนีและเลี้ยงให้บริสุทธิ์แล้วทำการตั้งเชื้อสายพันธุ์ streptomycetes ที่ค้นพบว่า WPN31 ซึ่งจากการเพาะเลี้ยง WPN31 บนอาหาร ISP2 เป็นเวลา 14 วัน พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ WPN31 (Figure 1) มีลักษณะพื้นผิวของโคโลนีแข็งเป็นรอยย่น มีเส้นใยอาหารเป็นสีชมพูเข้ม ไม่มีการผลิตเม็ดสีที่สามารถกระจายเข้าไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ และมีเส้นใยอากาศเป็นสีขาว

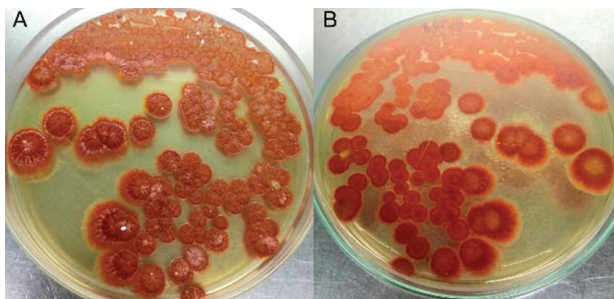


Figure 1 Colony morphology of *Streptomyces* sp. WPN31 in ISP2 agar with A: front and B: back mycelial images.

การตรวจสอบระดับโมเลกุลของ WPN31 โดยใช้ลำดับเบสของยีน 16S rRNA

นำลำดับเบสของยีน 16S rRNA ของสายพันธุ์ WPN31 (1424 bp) ไปเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ที่อยู่ในฐานข้อมูล Ezbiocloud โดยใช้ BLAST program (Table 1) ซึ่งผลการวิเคราะห์ยืนยันได้ว่า WPN31 เป็นเชื้อในจีนัส *Streptomyces* โดยมีความคล้ายคลึงกับ *Streptomyces griseicoloratus* (ร้อยละ 98.80) มากที่สุด รองลงมาคือ *Streptomyces prasinosporus* (ร้อยละ 98.73) และ *Streptomyces anandii* (ร้อยละ 98.66) จากข้อมูลการศึกษาของ Hagstrom และคณะ (2000) รายงานว่าถ้ามีค่าความคล้ายคลึงของลำดับเบสของยีน 16S rRNA มากกว่าร้อยละ 97 จะจัดให้อยู่ในสปีชีส์เดียวกัน แต่ถ้าค่าความคล้ายคลึงอยู่ในระดับร้อยละ 93-97 จะจัดให้อยู่ในจีนัสเดียวกันแต่จะแตกต่างกันที่ระดับสปีชีส์ แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 93 จะจัดให้เป็นจีนัสใหม่

Table 1 List of closet strains from EzBioCloud using 16S rRNA gene database of *Streptomyces* sp. WPN31.

Hit taxon name	Similarity (%)
<i>Streptomyces griseicoloratus</i>	98.80
<i>Streptomyces prasinosporus</i>	98.73
<i>Streptomyces anandii</i>	98.66

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการ BLAST ไปสร้างต้นไม้วิวัฒนาการ (Figure 2) พบว่า *Streptomyces* sp. WPN31 ไม่ได้ถูกจัดให้อยู่ในสายบรรพบุรุษเดียวกันกับ *S. griseicoloratus* ที่มีค่าความคล้ายคลึงกันสูงที่สุด แต่ถูกจัดให้อยู่กับ *S. prasinosporus* ที่มีความคล้ายคลึงกันเพียงร้อยละ 98.73 ซึ่งสายพันธุ์ WPN31 อาจมีความเป็นไปได้ที่จะไม่ได้เป็นสายพันธุ์เดียวกันกับ *S. griseicoloratus* หรือ *S. prasinosporus* หรืออาจจะเป็นสายพันธุ์ใหม่ (Kurnianto *et al.*, 2020) *S. griseicoloratus* ที่มีความคล้ายคลึงกับ WPN31 มากที่สุด มีการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 2022 โดยการแยกเชื้อจากดินในไร่ฝ้าย ในเมืองชินเจียง สาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งจากรายงานวิจัยพบว่า *S. griseicoloratus* ไม่สามารถสร้างเม็ดสีที่แพร่กระจายเข้าไปในอาหารแข็ง รวมทั้งพบว่าเส้นใยอากาศเป็นสีเทา และมีเส้นใยอาหารเป็นสีเหลืองเข้มเมื่อเลี้ยงบนอาหารแข็ง ISP2 (Xing *et al.*, 2022) ส่วนเชื้อ *S. prasinosporus* ถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 จากดินในประเทศอินเดีย มีลักษณะเด่นคือ มีการสร้างเส้นใยอากาศเป็นสีเขียว (Tresner *et al.*, 1966) จากข้อมูลทั้งหมดข้างต้น ทั้งความแตกต่างทางลักษณะสัณฐานวิทยา ค่าความคล้ายคลึงกันของลำดับเบสของยีน 16S rRNA และแผนภูมิต้นไม้วิวัฒนาการ อาจจะสรุปเบื้องต้นได้ว่า *S. griseicoloratus* และ *S. prasinosporus* มีความแตกต่างจาก WPN31 จึงมีความเป็นไปได้ว่า WPN31 อาจจะเป็นสายพันธุ์ใหม่ของจีนัส *Streptomyces*

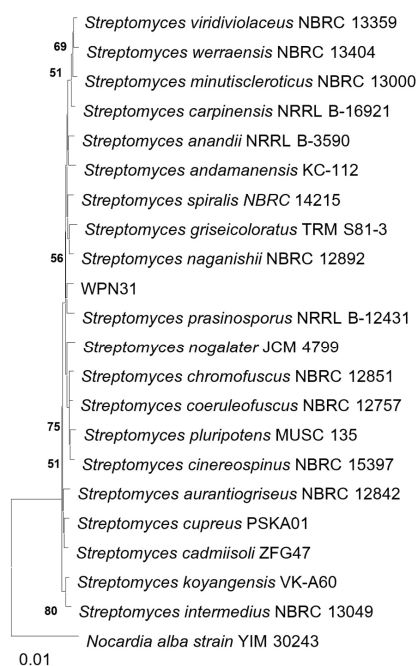


Figure 2 Neighbor-joining phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences showing the relationship between related members of the genus *Streptomyces* sp. WPN31. *Nocardia alba* was used as an outgroup. Bootstrap percentages over 50% are shown at the nodes. The scale bar indicated 0.01 nucleotide substitution per nucleotide.

ความสามารถของ *Streptomyces* sp. WPN31 ในการสร้าง เอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลาลเลส

การศึกษาความสามารถในการสร้างเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และไซลาลเนส โดยการลงเชื้อตำแหน่งเดียว โดยเฉพาะเลี้ยง *Streptomyces* sp. WPN31 บนอาหารเลี้ยงเชื้อ ที่มีแหล่งคาร์บอนหลักเป็นแป้ง เซลลูโลส หรือไซแลน และบ่ม ที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้น หยดสารละลายไอโอดีนหรือสี congo red บนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Figure 3) พบว่า *Streptomyces* sp. WPN31 สามารถผลิต เอนไซม์ย่อยสลายแหล่งคาร์บอนในอาหารเลี้ยงเชื้อได้ทั้งที่ อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส โดยสังเกตได้จากการสร้าง บริเวณใสบนอาหารเลี้ยงเชื้อ และทำการบันทึกผลการทดลอง โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดโคโลนีและบริเวณใส จาก นั้นหาค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดโคโลนีและบริเวณใสที่เกิดขึ้น (Figure 4) นอกจากนี้ เมื่อทดลองเลี้ยงเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าเชื้อไม่สามารถ เจริญเติบโตและสร้างเอนไซม์ได้ (ไม่ได้แสดงผลการทดลอง)

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า *Streptomyces* sp. WPN31 สามารถผลิตเอนไซม์ ไซลาลเนสได้สูงกว่าเอนไซม์ อื่นๆ ทั้งที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความ สอดคล้องกับ *Streptomyces fulvissimus* CKS7 ที่พบว่ามีการ ผลิตเอนไซม์ไซลาลเนสได้สูงกว่าเอนไซม์อะไมเลสและเซลลูเลส เมื่อเพาะเลี้ยงเชื้อโดยใช้รำข้าวสาลี รำข้าวบาร์เลย์ และรำข้าว (Mihajlovski *et al.*, 2020) และ *Streptomyces* sp. สายพันธุ์ 15, 18 และ 30 ที่แยกได้จากดินเกษตร มีการผลิตเอนไซม์ ไซลาลเนสได้สูงกว่าเอนไซม์เซลลูเลสในทุกช่วงเวลาของการเพาะ เลี้ยงเชื้อ (Castaneda-Cisneros *et al.*, 2020) แต่มีรายงาน ของ *Streptomyces mutabilis* ที่พบว่ามีการผลิตเอนไซม์ เซลลูเลสมากกว่าเอนไซม์อะไมเลส และไม่มีการสร้างเอนไซม์ ไซลาลเนสเกิดขึ้น (Shinde. & Jadhav., 2021) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นงานแรก ที่ศึกษาความสามารถในการสร้างเอนไซม์ อะไมเลส เซลลูเลส และ ไซลาลเนส ของเชื้อ *Streptomyces* sp. WPN31

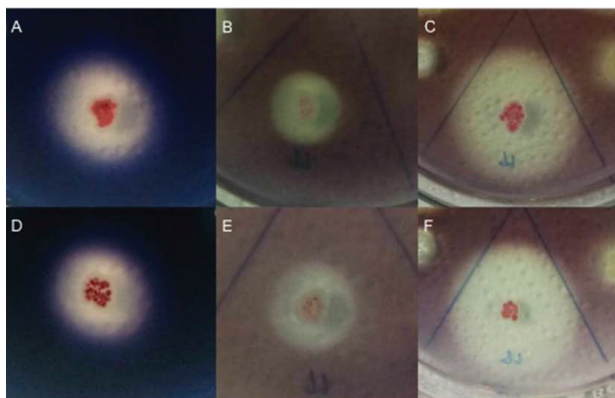


Figure 3 The clear zone of amylase activity at 37 °C and 40 °C (A and D), cellulase activity at 37 °C and 40 °C (B and E) and xylanase activity at 37 °C and 40 °C (C and F) respectively.

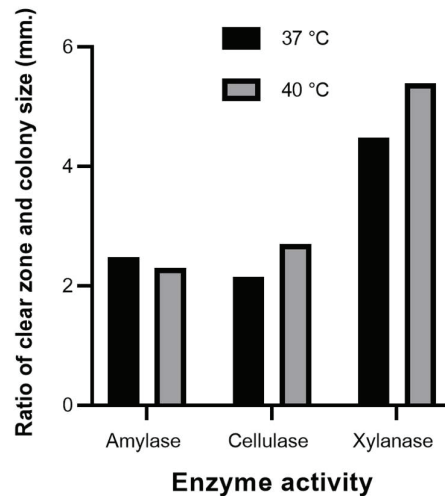


Figure 4 The ratio of clear zone of enzyme activity and colony size at 37 °C and 40 °C. All experiments were performed in triplicate.

เป็นที่ทราบกันดีว่า *Streptomyces* ที่แยกได้จาก สิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เป็นผู้ผลิตเอนไซม์ชนิดใหม่ที่มีศักยภาพสูง ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเอนไซม์สำคัญที่ ผลิตจากเชื้อในจีนัส *Streptomyces* ได้แก่ เอนไซม์ไซลาลเนส โคติเนส อะไมเลส ไลเปส คิวติเนส เพคติเนสและเซลลูเลส (Kumar *et al.*, 2020; Mukhtar *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ยังมีรายงานการค้นพบเชื้อในจีนัส *Streptomyces* ที่สามารถ ทนร้อนได้สูงและยังผลิตเอนไซม์ได้ในปริมาณสูง เช่น *Streptomyces thermocoprophilus* CP1 ผลิตเอนไซม์เซลลูเลส และทนความร้อนได้สูงถึง 45 องศาเซลเซียส (Tingthong *et al.*, 2021) *Streptomyces* sp. MI-1 และ *Streptomyces* sp. Al-Dhabi-46 ผลิตเอนไซม์อะไมเลสได้สูง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Al-Dhabi *et al.*, 2020; Ali *et al.*, 2022) *Streptomyces albus* และ *Streptomyces hygroscopicus* ผลิตเอนไซม์ไซลาลเนสและทนความร้อนได้สูงถึง 50 องศา เซลเซียส (Priya *et al.*, 2012) ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้ถูกนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยา ผงซักฟอก และ ไปโอเอทานอล เป็นต้น (Mohammed *et al.*, 2011; Tingthong *et al.*, 2021) ดังนั้น WPN31 จึงอาจจะเป็นสายพันธุ์ใหม่ของ จีนัส *Streptomyces* ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์ ทั้งสามชนิดและทนความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

ความสามารถของ *Streptomyces* sp. WPN31 ในการยับยั้ง การสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค

ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาสารประกอบที่ *Streptomyces* sp. WPN31 ปล่อยออกมาออกเซลล์ ที่ไม่มี ผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค แต่มีผลต่อ ความสามารถในการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ในการก่อโรคที่รุนแรง

(virulence factors) เช่น การยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม เนื่องจากแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในสภาวะไบโอฟิล์มสามารถทนต่อระบบภูมิคุ้มกันของโฮสต์ ยาปฏิชีวนะ และการรักษาด้วยวิธีอื่นๆ (Vestby *et al.*, 2020) การศึกษาการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* โดยใช้ส่วนเหนือตะกอนของ WPN31 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละของการสร้างไบโอฟิล์มบนเพลท 96 หลุมของสารเหนือตะกอนของ WPN31 กับชุดควบคุม จะเห็นได้ว่า เชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่ผสมกับส่วนเหนือตะกอน มีการสร้างไบโอฟิล์มลดลง (Figure 5) พบว่า การสร้างไบโอฟิล์มของ *S. aureus* ลดลงร้อยละ 41 และ *P. aeruginosa* ลดลงร้อยละ 24

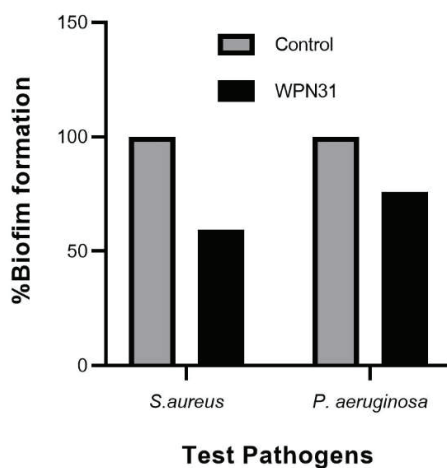


Figure 5 Inhibition of biofilm formation by *Streptomyces* sp. WPN31 supernatant against *S. aureus* and *P. aeruginosa*. All experiments were performed in triplicate.

ซึ่งการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มโดยใช้ส่วนเหนือตะกอน อาจจะเกี่ยวข้องกับการผลิตเอนไซม์นอกเซลล์ เนื่องจากมีรายงาน การนำส่วนเหนือตะกอนที่สามารถยับยั้งไบโอฟิล์มได้ ไปสกัดเป็นสารสกัดหยาบ พบว่าการสร้างไบโอฟิล์มของ *S. aureus* หายไป แสดงว่าสารประกอบที่สามารถยับยั้งไบโอฟิล์มที่อยู่ในส่วนเหนือตะกอน ซึ่งอาจเป็นสารในกลุ่มเปปไทด์หรือโปรตีนนอกเซลล์ที่เชื้อผลิตออกมา (Park *et al.*, 2012) Flemming และ Wingender (2010) รายงานว่าเอนไซม์นอกเซลล์มีบทบาทหลายอย่างที่มีผลต่อการสร้างไบโอฟิล์ม ทั้งในด้านโครงสร้างของไบโอฟิล์มและการสื่อสารของเซลล์ภายในไบโอฟิล์ม

มีรายงานการศึกษาเอนไซม์นอกเซลล์จากเชื้อรา *Penicillium janthinellum* ที่สามารถผลิตเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส และโปรตีนเอส และพบว่าสามารถยับยั้งไบโอฟิล์มของ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* (Nagraj & Gokhale, 2018) นอกจากนี้ยังมีรายงานการสกัดเอนไซม์อะไมเลสจาก

Streptomyces griseus (Lakshmi *et al.*, 2022) รวมถึงการศึกษาเอนไซม์ไฮลาเนสที่ผลิตจากเชื้อรา *Thermomyces lanuginosus* (Lee *et al.*, 2018) สามารถยับยั้งไบโอฟิล์มของ *P. aeruginosa* และมีการศึกษาเอนไซม์เอนโดกลูคาเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งในกลุ่มของเอนไซม์เซลลูเลส ก็พบว่าสามารถยับยั้งไบโอฟิล์มของ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* ได้ (Karmakar *et al.*, 2023)

นอกจากการใช้เอนไซม์เพื่อยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มแล้ว ยังพบว่ามีรายงานการนำสารต้านจุลชีพมาใช้ในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มด้วย โดยมีรายงานการใช้สารต้านจุลชีพที่สกัดจาก *Streptomyces ansochromogenes* สามารถยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อก่อโรค *P. aeruginosa* (Amorim *et al.*, 2020) รวมถึงการใช้สารต้านจุลชีพจาก *Streptomyces euryhalinus* สามารถยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อ *S. aureus* ได้ (Biswas *et al.*, 2021) แต่แม้ว่าจะใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่าค่าความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (minimum inhibitory concentration หรือ MIC) เพื่อยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม ก็พบว่า สารต้านจุลชีพก็ยังคงมีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* (Dong *et al.*, 2012) และอาจจะชักนำให้เกิดการก่อตัวของไบโอฟิล์มของ *P. aeruginosa* เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการใช้สารต้านจุลชีพในความเข้มข้นที่ต่ำกว่าค่า MIC ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เชื้อแบคทีเรียก่อโรคติดต่อยาปฏิชีวนะได้ (Aka & Haji, 2015) และเพื่อพิสูจน์ว่าการยับยั้งไบโอฟิล์มของ *Streptomyces* sp. WPN31 ไม่ได้มีปัจจัยมาจากสารต้านจุลชีพ ผู้วิจัยจึงตรวจสอบความสามารถของสายพันธุ์ WPN31 ในการสร้างสารต้านจุลชีพและพบว่า WPN31 ไม่สามารถสร้างสารต้านจุลชีพที่ออกฤทธิ์ต่อเชื้อ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* (ไม่ได้แสดงผลการทดลอง) ดังนั้นฤทธิ์การยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *Streptomyces* sp. WPN31 ต่อเชื้อ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* น่าจะมาจากการทำงานร่วมกันของเอนไซม์นอกเซลล์ (อะไมเลส เซลลูเลส และไฮลาเนส) ที่สร้างจากเชื้อ WPN31

นอกจากนี้ การยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *Streptomyces* sp. WPN31 ที่สามารถยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *S. aureus* ได้มากกว่า *P. aeruginosa* อาจเกิดได้จากประสิทธิภาพของการผ่านของเอนไซม์เข้าไปในแบคทีเรียแกรมลบมีน้อย ซึ่งการผ่านของสารได้ต่ำนี้ ทำให้เป็นอุปสรรคในการผ่านของยาปฏิชีวนะและโมเลกุลขนาดเล็กอื่นๆ อีกด้วย เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นโครงสร้างของลิโปโพลีแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide หรือ LPS) ช่วยป้องกันไม่ให้โมเลกุลที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ผ่านเข้าไปได้ ซึ่งมีความแตกต่างจากโครงสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก ที่มีเพียงชั้นของเพปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) ซึ่งไม่ได้เป็นอุปสรรคในการผ่านของสารประกอบ

ต่างๆ ทำให้แบคทีเรียแกรมบวกมีความไวต่อสารประกอบ
ต่างๆ มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Kurnianto *et al.*, 2020;
Singh *et al.*, 2014)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า *Streptomyces* sp.
WPN31 ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่แยกได้จากบริเวณรากต้นเตยหอม
มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ที่สำคัญในอุตสาหกรรม
ได้แก่ อะไมเลส เซลลูเลส และไซลันเนส ที่อุณหภูมิ 37 และ
40 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
ที่หลากหลายได้ นอกจากนี้ *Streptomyces* sp. WPN31 ยังมี
ประสิทธิภาพในการยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของ *S. aureus*
และ *P. aeruginosa* งานวิจัยนี้จัดเป็นงานวิจัยแรกที่รายงาน
ฤทธิ์การยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อ *Streptomyces* sp.
WPN31

ทั้งนี้การศึกษาในอนาคตของเชื้อ *Streptomyces* sp.
WPN31 ควรมุ่งเน้นการแยกและระบุลักษณะของสารออกฤทธิ์
ยับยั้งไบโอฟิล์มที่หลั่งออกมาจากเซลล์

กิตติกรรมประกาศ

This work was supported by Suranaree University
of Technology, Thailand Science Research and Innovation
(TSRI), and National Science, Research, and Innovation
Fund (NSRF) (NRIIS number: 160348; Project code:
FF1-111-65-12-10). Wannika Pana expresses her
gratitude to Kittibuditt scholarships for the financial
support for her tuition.

เอกสารอ้างอิง

Aka, S. T., & Haji, S. H. (2015). Sub-MIC of antibiotics
induced biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa*
in the presence of chlorhexidine. *Brazilian Journal of*
Microbiology, 46(1), 149-154.

Al-Dhabi, N. A., Esmail, G. A., Ghilan, A.-K. M., Arasu,
M. V., Duraipandiyar, V., & Ponmurugan, K. (2020).
Isolation and purification of starch hydrolysing amylase
from *Streptomyces* sp. Al-Dhabi-46 obtained from
the Jazan region of Saudi Arabia with industrial
applications. *Journal of King Saud University-Science*,
32(1), 1226-1232.

Alam, K., Mazumder, A., Sikdar, S., Zhao, Y. M., Hao, J.,
Song, C., Wang, Y., Sarkar, R., Islam, S., Zhang,
Y., & Li, A. (2022). *Streptomyces*: The biofactory of
secondary metabolites. *Front Microbiol*, 13, 968053.

Ali, I., Sultan, S., Tahir Mahmood, R., Tariq, M., Shamim,
Z., Mushtaq, A., & Asiri, M. (2022). Production and
characterization of α -amylase from indigenously
isolated *Streptomyces* sp. *BioResources*, 18(1), 6-18.

Alotaibi, G. F. (2021). Factors Influencing Bacterial
Biofilm Formation and Development. *American*
Journal of Biomedical Science & Research, 12(6),
617-626.

Amorim, E., Castro, E. J. M., da Souza, S. V., Alves, M. S.,
Dias, L. R. L., Melo, M. H. F., da Silva, I. M. A., Villis,
P. C. M., Bonfim, M. R. Q., Falcai, A., Silva, M. R. C.,
Monteiro-Neto, V., Alianca, A., da Silva, L. C. N., &
de Miranda, R. C. M. (2020). Antimicrobial Potential of
Streptomyces ansochromogenes (PB(3)) Isolated From
a Plant Native to the Amazon Against *Pseudomonas*
aeruginosa. *Frontiers in Microbiology*, 11, 574693.

Balasubramanian, S., Othman, E. M., Kampik, D., Stopper,
H., Hentschel, U., Ziebuhr, W., Oelschlaeger, T. A., &
Abdelmohsen, U. R. (2017). Marine Sponge-Derived
Streptomyces sp. SBT343 Extract Inhibits Staphylococcal
Biofilm Formation. *Front Microbiol*, 8, 236.

Biswas, K., Bhattarcharya, D., Saha, M., Mukherjee, J., &
Karmakar, S. (2021). Evaluation of antimicrobial
activity of the extract of *Streptomyces euryhalinus*
isolated from the Indian Sundarbans. *Archives of*
Microbiology, 204(1), 34.

Castaneda-Cisneros, Y. E., Mercado-Flores, Y., Anducho-Reyes,
M. A., Alvarez-Cervantes, J., Ponce-Lira, B.,
Evangelista-Martinez, Z., & Tellez-Jurado, A. (2020).
Isolation and Selection of *Streptomyces* Species
from Semi-arid Agricultural Soils and Their Potential
as Producers of Xylanases and Cellulases. *Current*
Microbiology, 77(11), 3460-3472.

Chanhasena, P., Hua, Y., Rosyidah, A. I., Pathom-Aree, W.,
Limphirat, W., & Nantapong, N. (2022). Isolation and
Identification of Bioactive Compounds from *Streptomyces*
actinomycinicus PJ85 and Their In Vitro Antimicrobial
Activities against Methicillin-Resistant *Staphylococcus*
aureus. *Antibiotics*, 11(12), 1797.

Chanvatik, S., Kosiyaporn, H., Lekagul, A., Kaewhankhaeng, W.,
Vongmongkol, V., Thunyahan, A., & Tangcharoensathien, V.
(2019). Knowledge and use of antibiotics in Thailand:
A 2017 national household survey. *PLoS One*, 14(8),
e0220990.

- Chater, K. F. (2016). Recent advances in understanding *Streptomyces*. *F1000Research*, 5, 2795.
- de Veras, B. O., dos Santos, Y. Q., Diniz, K. M., Carelli, G. S. C., & dos Santos, E. A. (2018). Screening of protease, cellulase, amylase and xylanase from the salt-tolerant and thermostable marine *Bacillus subtilis* strain SR60. *F1000Research*, 7, 1704.
- Djemouai, N., Meklat, A., Gaceb-Terrak, R., Youcef, K. O. H., Nacer, A., Saadi, S. A., Saad, S., Verheecke-Vaessen, C., & Bouras, N. (2022). *Streptomyces* species from the rhizosphere of the medicinal plant Artemisia herba-alba Asso: screening for biological activities. *Biologia*, 77(8), 2281-2299.
- Donald, L., Pipite, A., Subramani, R., Owen, J., Keyzers, R. A., & Taufu, T. (2022). *Streptomyces*: Still the Biggest Producer of New Natural Secondary Metabolites, a Current Perspective. *Microbiology Research*, 13(3), 418-465.
- Dong, L., Tong, Z., Linghu, D., Lin, Y., Tao, R., Liu, J., Tian, Y., & Ni, L. (2012, May). Effects of sub-minimum inhibitory concentrations of antimicrobial agents on *Streptococcus mutans* biofilm formation. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 39(5), 390-395.
- Flemming, C. H., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8, 623-633.
- Hagstrom, A., Pinhassi, J., & Zweifel, U. L. (2000). Biogeographical diversity among marine bacterioplankton *AQUATIC MICROBIAL ECOLOGY*, 21, 231-244.
- Holt, J. G., Krieg, N. R., Sneath, P. H. A., Stanley, J. T., & Williams, S. T. (1994). *Bergey's manual of determinative bacteriology* (9^{ed}). Williams and Wilkins. pp. 518-537.
- Kamali, E., Jamali, A., Izanloo, A., & Ardebili, A. (2021). In vitro activities of cellulase and ceftazidime, alone and in combination against *Pseudomonas aeruginosa* biofilms. *BMC Microbiology*, 21(1), 347.
- Karmakar, M., Lahiri, D., Nag, M., Dutta, B., Dash, S., Sarkar, T., Pandit, S., Upadhye, V. J., & Ray, R. R. (2023). Purification, Characterization, and Application of Endoglucanase from *Rhizopus oryzae* as Antibiofilm Agent. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 195(9), 5439-5457.
- Khamna, S., Yokota, A., Peberdy, J. F., & Lumyong, S. (2009). Antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from rhizosphere of Thai medicinal plants. *International Journal of Integrative Biology*, 6(3), 143-147.
- Kumar, M., Kumar, P., Das, P., Solanki, R., & Kapur, M. K. (2020). Potential applications of extracellular enzymes from *Streptomyces* spp. in various industries. *Arch Microbiol*, 202(7), 1597-1615.
- Kurnianto, M. A., Kusumaningrum, H. D., & Lioe, H. N. (2020). Characterization of *Streptomyces* Isolates Associated with Estuarine Fish Chanos chanos and Profiling of Their Antibacterial Metabolites-Crude-Extract. *International Journal of Microbiology*, 2020, 8851947.
- Lakshmi, S. A., Alexpandi, R., Shafreen, R. M. B., Tamilmuhilan, K., Srivathsan, A., Kasthuri, T., Ravi, A. V., Shiburaj, S., & Pandian, S. K. (2022). Evaluation of antibiofilm potential of four-domain alpha-amylase from *Streptomyces griseus* against exopolysaccharides (EPS) of bacterial pathogens using *Danio rerio*. *Archives of Microbiology*, 204(5), 243.
- Lee, J. H., Kim, Y. G., & Lee, J. (2018). Thermostable xylanase inhibits and disassembles *Pseudomonas aeruginosa* biofilms. *Biofouling*, 34(3), 346-356.
- Leetanasaksakul, K., & Thamchaipenet, A. (2018). Potential anti-biofilm producing marine actinomycetes isolated from sea sediments in Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 52(3), 228-233.
- Li, J., Zhang, L., Yao, G., Zhu, L., Lin, J., Wang, C., Du, B., Ding, Y., & Mei, X. (2022). Synergistic effect of co-culture rhizosphere *Streptomyces*: A promising strategy to enhance antimicrobial activity and plant growth-promoting function. *Frontiers in Microbiology*, 13, 976484.
- Li, Y., Dong, R., Ma, L., Qian, Y., & Liu, Z. (2022). Combined Anti-Biofilm Enzymes Strengthen the Eradicate Effect of *Vibrio parahaemolyticus* Biofilm: Mechanism on cpsA-J Expression and Application on Different Carriers. *Foods*, 11(9), 1305.
- Lomthong, T., Chorum, M., Samaimai, S., & Thongpoem, P. (2022). Antioxidant and antibacterial activities of *Pandanus amaryllifolius* Roxb. (Pandanaeae) prop roots and its application for a novel bacterial cellulose (Nata) fermentation by enzymatic hydrolysis. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 10, 147-152.

- Mendes, L. W., Raaijmakers, J. M., de Hollander, M., Mendes, R., & Tsai, S. M. (2018). Influence of resistance breeding in common bean on rhizosphere microbiome composition and function. *ISME J*, 12(1), 212-224.
- Mihajlovski, K., Buntić, A., Milić, M., Rajilić-Stojanović, M., & Dimitrijević-Branković, S. (2020). From Agricultural Waste to Biofuel: Enzymatic Potential of a Bacterial Isolate *Streptomyces fulvissimus* CKS7 for Bioethanol Production. *Waste and Biomass Valorization*, 12(1), 165-174.
- Mohammed, K., Roohi, Jamal M., Arif, & Pramod, W. R. (2011). An Overview of Cold-active Microbial α -amylase: Adaptation Strategies and Biotechnological Potentials. *Biotechnology*, 10, 246-258.
- Mukhtar, S., Zaheer, A., Aiysha, D., Malik, K. A., & Mehnaz, S. (2017). Actinomycetes: A Source of Industrially Important Enzymes. *Journal of Proteomics & Bioinformatics*, 10(12), 316-319.
- Nagraj, A. K., & Gokhale, D. (2018). Bacterial Biofilm Degradation Using Extracellular Enzymes Produced by *Penicillium janthinellum* EU2D-21 under Submerged Fermentation. *Advances in Microbiology*, 8(9), 687-698.
- Newitt, J. T., Prudence, S. M. M., Hutchings, M. I., & Worsley, S. F. (2019). Biocontrol of Cereal Crop Diseases Using Streptomycetes. *Pathogens*, 8(2), 78.
- Nonthakaew, N., Panbangred, W., Songnuan, W., & Intra, B. (2022). Plant growth-promoting properties of *Streptomyces* spp. isolates and their impact on mung bean plantlets' rhizosphere microbiome. *Frontiers in Microbiology*, 13, 967415.
- Oberoi, K. J., Momin, T., Ande, R., & Katkar, n. (2020). Inhibition of Bacterial Biofilms by *Streptomyces* Derived Crude Extract. *Journal of Biology and Today's World*, 9(1), 211.
- Olanrewaju, O. S., & Babalola, O. O. (2019). *Streptomyces*: implications and interactions in plant growth promotion. *Appl Microbiol Biotechnol*, 103(3), 1179-1188.
- Park, J. H., Lee, J. H., Kim, C. J., Lee, J. C., Cho, M. H., & Lee, J. (2012). Extracellular protease in Actinomycetes culture supernatants inhibits and detaches *Staphylococcus aureus* biofilm formation. *Biotechnology Letter*, 34(4), 655-661.
- Priya, B. S., Stalin T., & Selvam, K. (2012). Efficient utilization of xylanase and lipase producing thermophilic marine actinomycetes *Streptomyces albus* and *Streptomyces hygrosopicus* in the production of ecofriendly alternative energy from waste *African Journal of Biotechnology*, 11, 14320-14325.
- Pumtong, S., Suwannaprom, P., Suttajit, S., Puripunyanich, N., & Kiatying-Angsulee, N. (2020). Irrational antibiotic use and distribution in the Thai community: a complex situation in need of integrative solution *Journal of Health Science*, 29, 72-81.
- Rodrigues, I. D. S. V., Silva, C. G. S. e., Silva, R. S. d., Dolabella, S. S., Fernandes, M. F., & Fernandes, R. P. M. (2019). Screening of bacterial extracellular xylanase producers with potential for cellulose pulp biobleaching. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 41(1).
- Sharma, D., Misba, L., & Khan, A. U. (2019). Antibiotics versus biofilm: an emerging battleground in microbial communities. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 8(1), 76.
- Shinde., G. M., & Jadhav., A. G. (2021). Characterization and production of groundnut-shell degrading cellulase of *Streptomyces mutabilis*. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 10(8), 153-159.
- Singh, L. S., Shama, H., & Talukdar, N. C. (2014). Production of potent antimicrobial agent by actinomycete, *Streptomyces sannanensis* strain SU118 isolated from phoomdi in Loktak Lake of Manipur, India *BMC Microbiology*, 14, 278.
- Solihin, J., Waturangi, D. E., & Purwadaria, T. (2021). Induction of amylase and protease as antibiofilm agents by starch, casein, and yeast extract in *Arthrobacter* sp. CW01. *BMC Microbiology*, 21(1), 232.
- Srinivasan, R., Santhakumari, S., Poonguzhali, P., Geetha, M., Dyavaiah, M., & Xiangmin, L. (2021). Bacterial Biofilm Inhibition: A Focused Review on Recent Therapeutic Strategies for Combating the Biofilm Mediated Infections. *Front Microbiol*, 12, 676458.
- Tan, L. T.-H., Chan, K.-G., Chan, C. K., Khan, T. M., Lee, L.-H., & Goh, B.-H. (2018). Antioxidative Potential of a *Streptomyces* sp. MUM292 Isolated from Mangrove Soil. *BioMed Research International*, 2018, 4823126.

- Tingthong, S., Suwanakood, P., Rattanachaikunsopon, P., & Sangswan, J. (2021). Production of Endoglucanases by *Streptomyces thermocoprophilus* CP1 using Rice Straw as a Substrate. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 15(4), 1963-1975.
- Tresner, H. D., Hayes, J. A., & Backus, E. J. (1966). *Streptomyces Prasinosporus* sp. nov. a new green-spored species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 16(2), 161-170.
- Vestby, L. K., Grønseth, T., Simm, R., & Nesse, L. L. (2020). Bacterial Biofilm and its Role in the Pathogenesis of Disease. *Antibiotics (Basel)*, 9(2), 59.
- Viswanathan, K., & Rebecca, J., L. . (2019). Screening of Amylase and Cellulase Enzymes from Marine Actinomycetes. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 12(8), 3787-3790.
- Xie, T. T., Zeng, H., Ren, X. P., Wang, N., Chen, Z. J., Zhang, Y., & Chen, W. (2019). Antibiofilm activity of three *Actinomycete* strains against *Staphylococcus epidermidis*. *Lett Appl Microbiol*, 68(1), 73-80.
- Xing, L., Xia, Y. Y., Zhang, Q. Y., Xia, Z. F., Wan, C. X., Zhang, L. L., & Luo, X. X. (2022). *Streptomyces griseicoloratus* sp. nov., isolated from soil in cotton fields in Xinjiang, China. *Archives of Microbiology*, 204(5), 254.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรากฏขึ้นของไมคอร์ไรซา และเห็ดกินได้ในแปลงปลูกไม้วงศ์ Dipterocarpaceae ในจังหวัดสุรินทร์

Factors that effected to the occurrences of wild mycorrhiza and edible mushroom of Dipterocarpaceae in Surin Province

ชวนพิศ จารัตน์¹, ยูพเยาว์ โตคีรี^{1*}, ธิตาภรณ์ นิลวรรณ², พรรณนิการ์ กงจักร³,
อำนาจ วัฒนกรศิริ¹ และ ไสว คณาเสน⁴

Chuanpit Jarat^{1*}, Yuppayao Tokeeree¹, Thitaporn Nnlawan², Phannika Kongjuk³,
Amnuay Wattanakornsiri¹ and Sawai Kanasen⁴

Received: 27 October 2023 ; Revised: 19 December 2023 ; Accepted: 26 January 2024

บทคัดย่อ

ไม้วงศ์ยางเป็นไม้มีค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทย และเป็นพรรณไม้ที่มีภาวะอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกันระหว่างรากไม้กับเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ไม้วงศ์ยางจึงมีความสำคัญต่อการชักนำการเกิดเห็ดได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซา เห็ดกินได้ และศึกษาปัจจัยแวดล้อมบางประการต่อการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยาง จำนวน 5 แปลง ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่อำเภอเมือง อำเภอศีขรภูมิ และอำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดสุรินทร์ โดยสำรวจรูปแบบการปลูก ชนิดไม้วงศ์ยางที่ปลูก ชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ที่พบ พร้อมเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์ระดับธาตุอาหาร ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณอินทรีย์วัตถุ รวมถึงเก็บข้อมูลความชื้นแสง ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ อุณหภูมิอากาศ และความชื้นดิน ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงธันวาคม พ.ศ. 2565 ผลการสำรวจพบว่า การปลูกไม้วงศ์ยางของเกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกในรูปแบบสวนป่า ชนิดไม้ที่นิยมปลูกมากที่สุดคือ ยางนา รองลงมาคือ ตะเคียนทอง และพะยอม ตามลำดับ ไม้ในทั้ง 5 แปลง มีอายุการปลูกตั้งแต่ 1-27 ปี ผลการสำรวจพบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาทั้งหมด 4 ชนิด จัดอยู่ใน 3 สกุล 3 วงศ์ เห็ดป่ากินได้ทั้งหมด 3 ชนิด 2 สกุล 2 วงศ์ โดยในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 1 พบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาสกุล *Amanita* มีความถี่การปรากฏมากที่สุดตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม รองลงมาพบสกุล *Russula* ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 4 ปรากฏตั้งแต่เดือนเมษายนถึงพฤษภาคม และพบเห็ดป่ากินได้สกุล *Termitomyces* มีความถี่การปรากฏมากที่สุดในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 3 ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงกันยายน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเห็ดป่าที่พบในแปลงกับปัจจัยแวดล้อม โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ Pearson's Correlation Analysis แสดงให้เห็นว่าความชื้นแสง ความชื้นดิน อินทรีย์วัตถุ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรากฏเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ในขณะที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความชื้นดิน และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการปรากฏเห็ดป่ากินได้ นอกจากนี้ยังพบว่า อายุไม้วงศ์ยาง และการปฏิบัติดูแลแปลงของเกษตรกร เช่น การเติมเชื้อเห็ดอย่างต่อเนื่อง มีส่วนสำคัญในการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ปัจจัยแวดล้อม, สมบัติดิน, การปรากฏ, เห็ดป่าไมคอร์ไรซา, ไม้วงศ์ยาง

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ สุรินทร์ 32000

² สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ สุรินทร์ 32000

³ สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ สุรินทร์ 32000

⁴ ศูนย์พัฒนาการเกษตรสุรินทร์อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ศรีสะเกษ 33140

¹ Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Surin 32000, Thailand

² Computer Science Program, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Surin 32000, Thailand

³ Economic Program, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Surin 32000, Thailand

⁴ Phu Sing Agricultural Development Center, Sisaket, Thailand

* Corresponding Author, e-mail: youngyao.t@srru.ac.th

Abstract

Dipterocarps are one of the most economically important trees of Thailand and are somewhat unusual among trees in that they form ectomycorrhizal (ECM) symbiotic root-inhabiting fungal associations. The purposes of this research were to examine type of wild mycorrhizal mushrooms and edible mushrooms and some environmental factors on wild mushrooms occurrence in five Dipterocarpaceae plantations, located in the Mueang, Sikhoraphum and Tha Tum Districts, Surin Province. In each sample, a plantation system survey was conducted, which included types of dipterocarps, mycorrhizal mushrooms, edible wild mushrooms and soils, and analysis of soil properties, including soil nutrients, soil pH, and organic matter content. Environmental factors data was collected with the Internet of Things (IoT), including humidity, temperature and soil moisture, which were measured in the sample areas during February to December 2022. The result show that most of the Dipterocarpaceae plantations are planted as forest plantation systems. The most common is *Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G. Don, followed by *Hopea odorata* Roxb., and *Shorea roxburghii* G. Don, and were aged from 1 to 27 years old. In the survey, four species of mycorrhizal mushroom from three genera and three families, and three species of wild mushroom from two genera and two families, were identified. In the first plantation, *Amanita* was the most abundant mycorrhiza mushroom species, most frequently occurring from April to July. *Russula* was the most abundant mycorrhiza mushroom species in the fourth plantation and occurs most frequently from April to May. *Termitomyces* was the most abundant edible wild mushroom species in the third plantation, occurring most frequently from August to September. The relationship between wild mushrooms in plantations with environmental factors analyzed by the Pearson's correlation analysis found that wild mycorrhizal mushrooms had a positive correlation with soil moisture, organic matter and relative humidity. While, wild edible mushrooms had a positive correlation with organic matter, soil moisture, and relative humidity. Additionally, these results are dependent on the plantation management and adding mushroom inoculum.

Keywords: Environmental Factors, Soil Properties, Occurrence, Wild Mushrooms, Dipterocarpaceae

บทนำ

ไม้วงศ์ยางเป็นไม้มีค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทย พบการกระจายทั่วประเทศตามระบบนิเวศของพื้นที่ มีลักษณะเด่นคือ การมีลำต้นเปลาตรง จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์แตกต่างกันตามภูมิภาค และด้วยลักษณะเฉพาะของไม้วงศ์ยางที่สำคัญอีกประการคือ ภาวะการอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Mutualistic Symbiosis) ระหว่างรากไม้วงศ์ยางกับเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ไม้วงศ์ยางจึงมีความสำคัญต่อการชักนำการเกิดเห็ดได้เป็นอย่างดี (Nipada *et al.*, 2016) วัฒนธรรมการเก็บหาเห็ดป่าจึงพบได้ในพื้นที่ที่มีป่าและพื้นที่ปลูกไม้วงศ์ยาง โดยจากงานวิจัยของ ยุพเยาว์ และคณะ (2562) พบว่า ผลผลิตเห็ดป่าในจังหวัดสุรินทร์ ส่วนใหญ่มาจากป่าชุมชน ในช่วงฤดูเห็ดออกจะพบเห็นประชาชนนำเห็ดป่ามาจำหน่ายตามริมถนนและตลาดสดเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ผู้บริโภครอคอยซื้อเห็ดเช่นกัน ผลผลิตไม่เพียงพอต่อการจำหน่าย แม้ว่าจะมีราคาสูงถึง 200-500 บาทต่อกิโลกรัม เห็ดป่าจึงนับว่าเป็นสิ่งของหายากในขณะนี้ยังคงได้รับความนิยมอย่างสม่ำเสมอ เห็ดที่นิยมรับประทานและมีราคาสูงเช่น เห็ดระโงก เห็ดเผาะ เห็ดน้ำหมาก และเห็ดโคน เป็นต้น แปลงปลูกป่าไม้วงศ์ยางของเกษตรกรจึงมีศักยภาพในการพัฒนาให้เป็นแหล่งทรัพยากรชีวภาพท้องถิ่นที่สำคัญที่นำไปสู่การสร้างอาชีพ สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรผู้ปลูกไม้วงศ์ยางในช่วงระยะการเจริญเติบโตของไม้ได้

อย่างไรก็ตามการเกิดและการเจริญเติบโตของเห็ดป่าจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสม ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ เช่น ความชื้นอากาศ อุณหภูมิอากาศปริมาณน้ำฝน (Jang and Hur, 2011) และความเข้มแสง เป็นต้น (ศุทธิณี และคณะ, 2563) สมบัติดินบางประการ เช่น ความชื้นดินธาตุอาหารในดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Erlanson *et al.*, 2016) แต่ปัจจุบันข้อมูลการศึกษาปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมในการเกิดของของเห็ดป่าในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางยังมีการเผยแพร่เพียงน้อย ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซา เห็ดกินได้ และความสัมพันธ์ของสมบัติดินและปัจจัยแวดล้อมบางประการต่อการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางในจังหวัดสุรินทร์ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปวางแผนการจัดการแปลงปลูกไม้วงศ์ยางที่เหมาะสม เพื่อให้มีเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ชนิดต่าง ๆ และเผยแพร่ให้กับเกษตรกรหรือผู้สนใจต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความหลากหลายชนิดของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ที่พบในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์

2. เพื่อศึกษาปัจจัยแวดล้อมบางประการที่ส่งผลต่อการปรากฏของชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

การวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกแปลงต้นแบบการปลูกไม้วงศ์ยางของเกษตรกร ที่เป็นสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรักษป่าเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตด้วยเศรษฐกิจพอเพียง จังหวัดสุรินทร์ แบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) และตามศักยภาพของเกษตรกรซึ่งเป็นผู้นำกลุ่มจำนวน 5 แปลง ซึ่งมีที่ตั้งแปลงปลูกกระจายอยู่ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ แล้วบันทึกข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ด้วยเครื่อง Geographic Position System (GPS)

2. การศึกษารูปแบบการปลูกและชนิดไม้วงศ์ยางที่ปลูก

แปลงพื้นที่แปลงตัวอย่าง เพื่อสำรวจรูปแบบการปลูกชนิดไม้ไม้วงศ์ยางที่ปลูก ระบุรูปแบบการปลูกตามคู่มือรูปแบบการปลูกไม้ป่าโดยระบบวนเกษตร (กรมป่าไม้, 2556) และจำแนกชนิดพรรณไม้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาในภาคสนาม ระบุชนิดตามคู่มือการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์ไม้วงศ์ยาง (กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2556) พร้อมถ่ายภาพและบันทึกข้อมูล

3. การสำรวจเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้

สำรวจชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ที่พบในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางตลอดระยะเวลาการทำวิจัยตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนธันวาคม 2565 แล้วบันทึกวันที่พบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ในแต่ละครั้งเพื่อบันทึกจำนวนการปรากฏ พร้อมถ่ายภาพเห็ดที่ขึ้นในสภาพธรรมชาติ จำแนกชนิดด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาในภาคสนาม และระบุชนิดของเห็ดตามหนังสือ เอกสาร และสื่ออื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น คู่มือการสำรวจความหลากหลายของเห็ด (กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2554) คู่มือการศึกษาความหลากหลายเห็ด (บารมี และคณะ, 2560) และหนังสือเห็ดป่าเมืองไทย: ความหลากหลายและการใช้ประโยชน์ (นิวัฒน์, 2553)

4. การศึกษาสมบัติดินบางประการ

4.1 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินรวมในแปลงตัวอย่างให้กระจายครอบคลุมบริเวณที่พบเห็ดจำนวน 15 จุดต่อแปลง ด้วยวิธี Quadripartite จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เก็บทั้ง 15 จุดต่อแปลง มาคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยเก็บให้ได้ตัวอย่างดินน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม แล้วนำมาผึ่งในที่ร่มจนแห้งสนิท ใช้โกร่งบดตัวอย่างดินให้สามารถนำไปร่อนได้ นำเศษไม้หรือ

หญ้าที่ติดมาออก ร่อนตัวอย่างดินด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547 และกรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป.)

4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความชื้นด้วยวิธีการอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ การทดสอบระดับธาตุอาหารในดิน (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ด้วยชุดทดสอบ KU Soil Test Kit วัดค่าความเป็นกรด-ด่างวัดด้วย pH Meter ในอัตราส่วนดิน:น้ำ DI 1:5 วิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุด้วยวิธี Walley and Black นำค่าที่วิเคราะห์ได้มาประเมินสภาพความเป็นกรด-ด่าง และระดับอินทรีย์วัตถุในดินต่อไป (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

5. การเก็บข้อมูลสภาพอากาศ

ทำการเก็บข้อมูลสภาพอากาศ ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความเข้มแสง เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยทำการติดตั้งจำนวน 1 เครื่องต่อแปลง มีระยะเวลาบันทึกข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง และทำการเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลชนิดไม้ อายุไม้ รูปแบบการปลูก ชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ ช่วงเวลาการปรากฏของเห็ดและระดับธาตุอาหารมาจัดทำบัญชีข้อมูลรายแปลง ข้อมูลความชื้นดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และความเข้มแสง นำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics 26 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วย Microsoft Excel ระหว่างการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ในแปลงตัวอย่างทั้ง 5 แปลง กับค่าความชื้นดิน อินทรีย์วัตถุ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และความเข้มแสง

ผลการวิจัย

1. ที่ตั้งแปลงปลูก รูปแบบการปลูก และชนิดไม้วงศ์ยางที่ปลูก

พื้นที่ปลูกไม้วงศ์ยางจำนวน 5 แปลง มีที่ตั้งอยู่ใน 3 อำเภอ ได้แก่ แปลงที่ 1 ตั้งอยู่ที่อำเภอสี่พระยา จังหวัดสุรินทร์

มีเนื้อปลูก 5 ไร่ มีรูปแบบการปลูกแบบผสมผสาน โดยพบไม้วงศ์ยางที่ปลูกเพียงชนิดเดียวคือ ยางนา (*Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G. Don) จำนวน 20 ต้น อายุ 27 ปี มีลักษณะการปลูกเรียงเป็นแถวบนขอบแปลงปลูกพืชเกษตรหลากหลายชนิด เช่น มะนาว ฝรั่ง หอม ไข่ เป็นต้น และมีระยะห่างระหว่างต้นยางนา 4 เมตร สำหรับแปลงที่ 2, 3 และ 4 ตั้งอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ มีเนื้อที่ปลูก 4, 2 และ 2 ไร่ อายุการปลูก 9, 12 และ 5 ปี ตามลำดับ ทั้ง 3 แปลงมีรูปแบบการปลูกในรูปแบบสวนป่า ระยะปลูก 2x2 เมตร โดยไม้วงศ์ยางที่พบมากที่สุดได้แก่ ยางนา (*Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G.

Don) เฉลี่ยจำนวน 720 ต้นต่อไร่ หรือร้อยละ 90 ของพื้นที่ปลูก รองลงมาคือ ตะเคียนทอง (*Hopea odorata* Roxb.) และพะยอม (*Shorea roxburghii* G.) คิดเป็นร้อยละ 3 และ 2 ตามลำดับ สำหรับแปลงที่ 5 ตั้งอยู่ที่อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ มีเนื้อที่ปลูก 2 ไร่ มีรูปแบบการปลูกแบบสวนป่า โดยพบไม้วงศ์ยางที่ปลูกเพียงชนิดเดียวคือ ยางนา (*Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G. Don) จำนวน 10 ต้น มีอายุ 2 ปี และมีลักษณะการปลูกร่วมกับไม้ป่ามีค่าทางเศรษฐกิจชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พะยูง สัก และประดู่ ในระยะปลูก 2x2 เมตร

Table 1 Location, types of dipterocarps and patterns of dipterocarpaceae plantations

Study areas	Location		Latitude	Longitude	Dipterocarp Trees	Age (Year)	Plantation System	Area (Rai)
	Subdistrict	District	X	Y				
Plantation 1	Yang	Sikhorphum	14.960737	103.880193	<i>D. alatus</i>	20	Agroforestry	5
Plantation 2	Tha Sawang	Mueang	14.986918	103.430536	<i>D. alatus</i> <i>H. odorata</i>	9	Plantation	2
Plantation 3	Tha Sawang	Mueang	14.974047	103.481625	<i>D. alatus</i> , <i>S. roxburghii</i> , <i>H. odorata</i>	12	Plantation	4
Plantation 4	Chaniang	Mueang	14.766190	103.473746	<i>D. alatus</i>	5	Plantation	2
Plantation 5	Ponkhrok	Thatum	15.431545	103.748906	<i>D. alatus</i>	1	Plantation	2

2. ชนิดและการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้

แปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 1 มีความถี่ของการปรากฏเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงอื่น ๆ โดยชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาที่พบได้บ่อยที่สุดอยู่ในกลุ่มเห็ดระโงก สกุล *Amanita* วงศ์ *Amanitaceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดระโงกเหลือง พบการปรากฏตั้งแต่เดือนเมษายนถึงกรกฎาคม จำนวนทั้งหมด 7 ครั้ง รองลงมาพบในสกุล *Boletus* วงศ์ *Boletaceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดผึ้ง พบการปรากฏตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเมษายน จำนวน 3 ครั้ง นอกจากนี้ยังพบเห็ดป่ากินได้ในสกุล *Phallus* วงศ์ *Phallaceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดร่างแห พบการปรากฏในเดือนมิถุนายน จำนวน 2 ครั้ง และพบสกุล *Termitomyces* วงศ์ *Tricholomataceae* จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ เห็ดโคนข้าวตอก พบการปรากฏในเดือนกรกฎาคม จำนวน 1 ครั้ง และเห็ดโคน พบการปรากฏในเดือนกันยายน จำนวน 4 ครั้ง

ชนิดเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดกินได้ที่มีความถี่และปริมาณในการปรากฏรองลงมาคือ แปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 2 และ 4 โดยแปลงที่ 2 พบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาเพียงกลุ่มเดียวคือ กลุ่มเห็ดตะไคล่ สกุล *Russula* วงศ์ *Russulaceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดตะไคล่ขาว พบการปรากฏตั้งแต่เดือนเมษายนถึงพฤษภาคม จำนวน 2 ครั้ง สำหรับแปลงที่ 4 พบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาเพียงกลุ่มเดียวคือ กลุ่มเห็ดตะไคล่ สกุล *Russula* วงศ์ *Russulaceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดแดงน้ำหมาก พบการปรากฏตั้งแต่เดือนเมษายนถึงพฤษภาคม จำนวน 2 ครั้ง ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 3 ไม่พบการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซา แต่พบเห็ดป่ากินได้ในสกุล *Termitomyces* วงศ์ *Tricholomataceae* จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ เห็ดโคน พบการปรากฏในเดือนสิงหาคมถึงกันยายน จำนวน 4 ครั้ง และในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 5 ไม่พบการปรากฏทั้งเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ ผลการสำรวจชนิดและการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ที่สำรวจได้แสดงดัง Table 2 และ Figure 1

Table 2 Types of mycorrhiza and edible mushroom in dipterocapaceae plantations

Study areas	Family	Scientific Name	Types	Period Time	Frequency
Plantation 1	Amanitaceae	<i>Amanita javanica</i>	Mycorrhiza	April-July	7
	Boletaceae	<i>Boletus griseipurpureus</i>	Mycorrhiza	March-April	3
	Phallaceae	<i>Phallus indusiatus</i>	Edible	June	2
	Tricholomataceae	<i>Termitomyces microcarpus</i>	Edible	July	1
	Tricholomataceae	<i>Termitomyces robustus</i>	Edible	September	4
Plantation 2	Russulaceae	<i>Russula delica</i>	Mycorrhiza	April-May	2
Plantation 3	Tricholomataceae	<i>Termitomyces fuliginosus</i>	Edible	August-September	4
Plantation 4	Russulaceae	<i>Russula emetica</i>	Mycorrhiza	April-May	2
Plantation 5	Not found				



Figure 1 Species of wild mycorrhizal mushrooms and edible mushrooms in dipterocapaceae plantations, Surin Province : (A) *Amanita javanica*, (B) *Boletus griseipurpureus*, (C) *Russula delica*, (D) *Russula emetica*, (E) *Phallus indusiatus*, (F) *Termitomyces microcarpus*, (G) *Termitomyces robustus* and (H) *Termitomyces fuliginosus*

3. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีดินบางประการ

ผลการศึกษาสสมบัติดินทางกายภาพพบว่า ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลง มีปริมาณความชื้นดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้นแปลงที่ 2 และ 3 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทั้ง 5 แปลง มีปริมาณความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.23-21.25 เปอร์เซ็นต์ ในแปลงที่ 1 มีปริมาณความชื้นดินสูงสุดเท่ากับ 21.25 เปอร์เซ็นต์ และแปลงที่ 5 มีปริมาณความชื้นต่ำสุดเท่ากับ 7.23 เปอร์เซ็นต์ ดัง Table 3 สำหรับสมบัติดินทางเคมีพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้นแปลงที่ 2, 3, และ 4 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในแปลงที่ 1 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.82

หรือดินมีสภาพเป็นกรดปานกลาง แปลงที่ 2 และ 4 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.75 หรือดินมีสภาพเป็นกลาง แปลงที่ 3 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.50 หรือดินมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย และแปลงที่ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.60 หรือดินมีสภาพเป็นด่างปานกลาง สำหรับระดับธาตุอาหารในดิน (N P K) พบว่า ในทุกแปลงมีระดับธาตุอาหารอยู่ในระดับต่ำ และปริมาณอินทรีย์วัตถุพบว่ามีในแปลงที่ 1, 2, 3 และ 4 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนในแปลงที่ 5 พบว่า มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับแปลงที่ 1, 2, 3 และ 4 แสดงดัง Table 3

Table 3 The study of some soil properties

Study areas	Soil Moisture [*] (%)	pH [*]	Soil pH Level [*]	N P K Level	Organic Matter [*] (%)	OM Level
Plantation 1	21.25±0.17 ^d	5.82±0.31 ^a	Moderately acidic	Low	3.62±0.09 ^b	High
Plantation 2	19.75±0.24 ^c	6.75±0.43 ^b	Neutral	Low	3.60±0.15 ^b	High
Plantation 3	18.94±0.53 ^c	6.50±0.25 ^b	Slightly acidic	Low	3.62±0.21 ^b	High
Plantation 4	13.48±0.20 ^b	6.75±0.33 ^b	Neutral	Low	3.50±0.35 ^b	High
Plantation 5	7.23±0.34 ^a	7.60±0.18 ^c	Moderately alkaline	Low	1.53±0.22 ^a	Relatively low

* : significance at $p < 0.05$

a,b,c,d Means with different letters within a columns significantly different ta $P \leq 0.05$ according to DMRT

4. ผลการตรวจวัดสภาพอากาศ

ผลการศึกษาสภาพอากาศพบว่า ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลง มีค่าอุณหภูมิอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้น แปลงที่ 2 และ 3 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในแปลงที่ 5 มีค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุดเท่ากับ 31.32±23.81 องศาเซลเซียส และมีค่าต่ำสุดในแปลงที่ 4 เท่ากับ 27.82±2.64 องศาเซลเซียส สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศพบว่า ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลง มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้น แปลงที่ 2 และ 3 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในแปลงที่ 4 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงสุดเท่ากับ 87.71±12.13 เปอร์เซ็นต์และมีค่าต่ำสุดในแปลงที่ 5 เท่ากับ 66.06±22.26 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความเข้มแสง พบว่า ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลง มีค่าความเข้มแสงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยในแปลงที่ 1 มีค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 25,092.99±108.89 ลักซ์ และมีค่าต่ำสุดในแปลงที่ 2 เท่ากับ 769.52±107.45 ลักซ์ แสดงดัง Table 4

Table 4 The study of some environment factors

Study areas	Temperature [*] (°C)	Relative Humidity [*] (%)	Light Density [*] (Lux)
Plantation 1	30.15±0.95 ^c	85.50±3.58 ^c	25,092.99±108.89 ^a
Plantation 2	28.18±3.13 ^b	84.59±12.92 ^b	769.52±107.45 ^a
Plantation 3	28.51±31.45 ^b	84.14±18.65 ^b	2,744.32±403.17 ^c
Plantation 4	27.82±2.64 ^a	87.71±12.13 ^d	973.20±605.09 ^b
Plantation 5	31.32±23.81 ^d	66.06±22.26 ^a	5318.83±773.43 ^d

* : significance at $p < 0.05$

a,b,c,d Means with different letters within a columns significantly different ta $P \leq 0.05$ according to DMRT

5. ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแวดล้อมกับการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการปรากฏของดอกเห็ดกับปัจจัยแวดล้อมบางประการในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลงพบว่า ความเข้มแสง ความชื้นดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับการความถี่ในการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ซึ่งความเข้มแสงเป็นปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซามากที่สุด รองลงมาคือความชื้นดิน อินทรีย์วัตถุ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.792, 0.735, 0.632 และ 0.579 ตามลำดับ

สำหรับการปรากฏของเห็ดป่ากินได้พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความชื้นดิน ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และความเข้มแสง มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับความถี่ในการปรากฏของเห็ดป่ากินได้ ซึ่งอินทรีย์วัตถุเป็นปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการปรากฏของเห็ดป่ากินได้มากที่สุด รองลงมาคือความชื้นดิน ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และความเข้มแสง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.988, 0.988, 0.971 และ 0.406 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิอากาศ มีความสัมพันธ์ในทิศทางผกผันกับการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ แสดงดัง Table 5

Table 5 Correlation coefficient between frequency of wild mycorrhizal and edible mushrooms occurrence and some environmental factors

Types	Soil Moisture	Organic Matter	Temperature	Relative Humidity	Light Density
Mycorrhiza Mushrooms	0.735	0.632	-0.726	0.579	0.792
Edible Mushrooms	0.988	0.971	-0.814	0.998	0.406

สรุปและวิจารณ์ผล

แปลงปลูกไม้วงศ์ยางของเกษตรกรส่วนใหญ่มีรูปแบบการปลูกเป็นสวนป่า โดยในแปลงมีการปลูกไม้วงศ์ยางหลายชนิด ชนิดที่ปลูกมากที่สุดคือ ยางนา (*Dipterocarpus alatus* Roxb. ex G. Don) รองลงมาคือตะเคียนทอง (*Hopea odorata* Roxb.) และพะยอม (*Shorea roxburghii* G.) อีกรูปแบบการปลูกที่พบคือ การปลูกไม้วงศ์ยางผสมผสานร่วมกับไม้ป่ามีค่าทางเศรษฐกิจและพืชเกษตรอื่น ๆ เช่น พะยูง ลักแดง มะนาว มะม่วง ฝรั่ง หมากรูด ไม้กระเจียว เป็นต้น ชนิดไม้วงศ์ยางที่ปลูกมากที่สุดคือ ยางนา รองลงมาคือตะเคียนทอง และพะยอม โดยอายุไม้วงศ์ยางในทั้ง 5 แปลง มีอายุตั้งแต่ 1-27 ปี การปรากฏชนิดและความถี่ในการปรากฏพบในแปลงที่ 1 มีความถี่ในการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอายุไม้วงศ์ยางที่มากขึ้นมีผลต่อความถี่ในการพบเห็ดป่ามากขึ้นด้วย (Martin-Pinto et al., 2022)

เมื่อพิจารณาด้านปัจจัยแวดล้อมทั้งสมบัติดินและสภาพภูมิอากาศพบว่า เป็นสิ่งสำคัญอีกประการที่มีผลต่อความถี่และความหลากหลายชนิดในการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้ โดยค่าความเข้มแสง ความชื้นดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ตามลำดับ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความชื้นดิน ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และ

ความเข้มแสง มีความสัมพันธ์กับการปรากฏของเห็ดป่ากินได้ ตามลำดับ

ผลจากงานวิจัยนี้ยังพบว่า ดินในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงจะส่งผลต่อการปรากฏเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากินได้มากกว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำอีกด้วย โดยเฉพาะเห็ดระโงกเหลือง (*Amanita javanica*) ที่พบการปรากฏได้บ่อยครั้งที่สูงในแปลงที่ 1 เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมหลายปัจจัยที่แตกต่างจากแปลงอื่นคือ ความชื้นดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นในอดีตด้วยว่า เชื้อราเอคโตไมคอร์ไรซาเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความชื้นในดินสูงไปจนถึงสภาพพื้นที่น้ำท่วม (Thomas, 2021) ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยบางงานวิจัยรายงานว่า เชื้อราเอคโตไมคอร์ไรซายังสามารถพบได้ในสภาพแวดล้อมที่มีความแห้งแล้งสูงและพื้นที่ทะเลทรายด้วยเช่นกัน (Trappe, 1977; Kennedy and Peay 2007; Lennon et al. 2012) (Navarro-Ródenas et al., 2012) นอกจากนี้ความชื้นดินยังพบว่า สภาพความเป็นกรด-ด่างของดินในทุกแปลงยังมีค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราเอคโตไมคอร์ไรซาที่ส่วนใหญ่เจริญได้ที่ค่า pH อยู่ระหว่าง 5-8 (Erlandson et al., 2016)

เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดระดับธาตุอาหารในดินพบว่า ดินในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางทั้ง 5 แปลง มีปริมาณธาตุอาหารในดินต่ำ แต่ยังสามารถพบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาได้ เนื่องจากเชื้อราไมคอร์ไรซามีประสิทธิภาพในการดึงดูด

สารอาหารที่อยู่ในดินเป็นอย่างดีจนสามารถพัฒนาเป็นดอกเห็ด และนอกจากนี้ยังช่วยให้พืชที่เจริญเติบโตได้ในสภาพดินที่มี สารอาหารต่ำเจริญเติบโตได้ดีอีกด้วย เนื่องจากความสามารถ ของเส้นใยต่อการดูดสารอาหารและน้ำในดินเพื่อเป็นแหล่ง พลังงานให้กับเชื้อราไมคอร์ไรซาได้เป็นอย่างดีอีกด้วย (Policelli *et al.*, 2020, Lindahl *et al.*, 2021) สำหรับปริมาณ อินทรีย์วัตถุในดินพบว่า แปลงปลูกไม้วงศ์ยางที่มีปริมาณ อินทรีย์วัตถุในดินสูงเป็นแปลงที่พบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาได้ บ่อยครั้งและดอกเห็ดมีขนาดใหญ่ ส่วนในดินที่มีอินทรีย์วัตถุ ในระดับปานกลางพบเห็ดป่าไมคอร์ไรซาได้น้อย และไม่พบ เห็ดป่าไมคอร์ไรซาในดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ เนื่องจาก ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงสามารถเป็นแหล่งแลกเปลี่ยนพลังงานที่ ดีต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราไมคอร์ไรซา ในขณะที่เดียวกัน เส้นใยของเชื้อราเอคโตไมคอร์ไรซาที่ตายแล้ว อาจมีส่วนสำคัญ ต่อการกักตัวของอินทรีย์วัตถุในดินด้วย (Anders *et al.*, 2022)

สำหรับปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศก็มีส่วนสำคัญ เช่นกันต่อการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้พบว่า ความชื้นแฉะ เป็นปัจจัยสำคัญที่ ส่งผลต่อการปรากฏของเห็ดป่าไมคอร์ไรซามากที่สุด ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยของ ศุภรัตน์ และคณะ (2563) ที่กล่าวไว้ว่า แสง เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของเห็ดป่าไมคอร์ไรซา ชนิดต่าง ๆ ในขณะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อการปรากฏของเห็ดป่ากินได้มากที่สุด

นอกจากปัจจัยแวดล้อมแล้ว ความถี่ในการปรากฏ และความหลากหลายชนิดของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่ากิน ได้ได้นั้น ยังขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติดูแลแปลงปลูกของเกษตรกร ด้วย เช่น ในแปลงที่ 1 พบความถี่การปรากฏและความหลาก ชนิดมากที่สุด เนื่องจากเกษตรกรเจ้าของแปลงมีการเติมเชื้อ เห็ดป่าไมคอร์ไรซาลงในแปลงปลูกต่อเนื่องทุกปี ๆ ละ 2 ครั้ง ซึ่งทำต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลา 8 ปี โดยการนำดอกเห็ดสด ที่พบในแปลงฝังลงในบริเวณที่พบเห็ด หรือมีการทำหัวเชื้อ จากดอกเห็ดสดราดลงบนบริเวณรากไม้วงศ์ยาง และไม่มี การรบกวนพื้นที่ในบริเวณที่พบเห็ด (ไม้ไผ่พรวน ไม้ซูด ไม้ เหยียบย่ำหรือค้ำยี่เขี่ย) รวมทั้งมีการนำไปไม้ปิดปกคลุมคลุม ดินในบริเวณที่พบเห็ดด้วย (อนันตพร; สัมภาษณ์, เมษายน 2565) ซึ่งวิธีการปฏิบัติเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการต่อ การเพิ่มความหลากหลายของเห็ดป่าไมคอร์ไรซาและเห็ดป่า กินได้ให้มีจำนวนมากขึ้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นต้น แบบของการนำนวัตกรรมการเพาะขยายเห็ดป่า ไมคอร์ไรซา ในแปลงปลูกไม้วงศ์ยางได้ แต่การเก็บผลผลิตที่เกิดจากการ

ใช้นวัตกรรมจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาที่มากกว่านี้ ควรเพิ่มพื้นที่ทดสอบการใช้นวัตกรรมและการเก็บข้อมูลปัจจัย แวดล้อมด้วยเทคโนโลยี IoT เพื่อความแม่นยำของข้อมูลผลผลิต และปัจจัยแวดล้อม ที่จะสามารถนำไปพัฒนาเป็นนวัตกรรม ที่ครอบคลุมทุกสภาพพื้นที่หรือครอบคลุมรูปแบบการปลูกไม้วงศ์ยางรูปแบบต่าง ๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมป่าไม้. (2556). *คู่มือรูปแบบการปลูกไม้ป่าโดยระบบวน เกษตร*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.forest.go.th/community/wp-content/uploads/sites/16/2020/01/รูปแบบการปลูกไม้ป่าโดยระบบวนเกษตร.pdf> สืบค้น วันที่ 4 มีนาคม 2565.
- กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2553). *คู่มือ การปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://www.idd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf>. สืบค้น วันที่ 15 มกราคม 2565.
- กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (ม.ป.ป). *ดินดี คลินิก*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://osl101.idd.go.th/web_soil_clinic/about_clinic2.htm สืบค้น วันที่ 15 มกราคม 2565.
- กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2554). *คู่มือการ สืบสวนความหลากหลายเห็ด (Mushrooms)*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://biodi.dnp.go.th/wp-content/uploads/2021/11/mushroom_2812564.pdf สืบค้น วันที่ 5 มีนาคม 2565.
- กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2554). *คู่มือการ อนุรักษ์และใช้ประโยชน์ไม้วงศ์ยาง*. [ออนไลน์]. เข้าถึง ได้จาก <https://www.dnp.go.th/DNPResearch1/Files/Publication/Book/เนื้อไม้ไม้วงศ์ยาง.pdf> สืบค้น วันที่ 4 มีนาคม 2565.
- นิวัฒน์ เสนาะเมือง. (2553). *เห็ดป่าเมืองไทย: ความหลากหลาย และการใช้ประโยชน์*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- บารมี สกกรักษ์ กิตติมา ด่วงแค วินันท์ดา หิมะมาน จันจิรา อายุวงค์ และกฤษฎณา พงษ์พานิช. (2560). *คู่มือการ ศึกษาความหลากหลายเห็ด*. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยการ อนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- ยุพเยาว์ โตศิริ, นองนุช สารภี, ดวงตา โนวาเชค และชวนพิศ จารัตน์. (2562). *การศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพ การกักเก็บคาร์บอนของไม้ยืนต้น และการฟุ้งฟางผลผลิตที่มีใช้เนื้อไม้ในระบบนิเวศป่าชุมชน จังหวัดสุรินทร์*. สุรินทร์: มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์.

- ศุภรัตน์ ไชยแก้ว, ชารรัตน์ แก้วกระจ่าง และอุทัยวรรณ แสงวณิช. (2563). ความหลากหลายชนิดของเห็ดป่าและอิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมบางประการต่อการปรากฏของเห็ดป่าในสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราชจังหวัดนครราชสีมา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 28(11), 1987-1999.
- สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมที่ดิน. (2547). *คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่าง ดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://oer.learn.in.th/ebook/result/113553/176834#page/1>. สืบค้น วันที่ 15 มกราคม 2565.
- อนันตพร ชันถม. 28 เมษายน 2565. *เกษตรกรเจ้าของแปลงปลูกไม้วงศ์ยางแปลงที่ 1*. สัมภาษณ์.
- Anders, T., Dimitrios, F. and Michiel. (2022). Decomposition of soil organic matter by ectomycorrhizal fungi: Mechanisms and consequences for organic nitrogen uptake and soil carbon stabilization. *Front. For. Glob.* 5, 1-9.
- Erlandson, S. R., Savage, J. A., Cavender-Bares, J. M. and Peay, K. G. (2016). Soil moisture and chemistry influence diversity of ectomycorrhizal fungal communities associating with willow along a hydrologic gradient. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(1), 1-9.
- Kennedy, P.G and Peay, K.G. (2007). Different soil moisture conditions change the outcome of the ectomycorrhizal symbiosis between *Rhizopogon* species and *Pinus muricata*. *Plant Soil*, 291, 55-65.
- Lennon, J.T., Aanderud, Z.T., Lehmkuhl, B.K. (2012). Mapping the niche space of soil microorganisms using taxonomy and traits. *Ecology*. 93, 1867-79.
- Lindahl, B. D., Kvaschenko, J., Varenus, K., Clemmensen, K. E., Dahlberg, A., Karlton, E. and Stendahl, J. (2021). A group of ectomycorrhizal fungi restricts organic matter accumulation in boreal forest. *Ecology Letters*, 24, 1341-1351.
- Martín-Pinto, P., Oria-de-Rueda, J.A., Dejene, T., Mediavilla, O., Hernández Rodríguez, M. Reque, J.A., Sanz-Benito, I. Santos, M. and Geml, J. (2022). Influence of stand age and site conditions on ectomycorrhizal fungal dynamics in *Cistus ladanifer*-dominated scrubland ecosystems. *ForEcol Manag*, 519, 1-11.
- Navarro-Ródenas, A., Ruíz-Lozano, J. M., Kaldenhoff, R. and Morte, A. (2012). The aquaporin TcAQP1 of the desert truffle *Terfezia claveryi* is a membrane pore for water and CO₂ transport. *Mol. Plant Microbe Int*, 25, 259-266.
- Nipada, R. D., Sunadda, Y., Prakitsin, S. and Jittra, P. (2016). Community structure and dynamics of ectomycorrhizal fungi in a dipterocarp forest fragment and plantation in Thailand. *Plant Ecology & Diversity*, 9(5-6), 577-588.
- Jang, S.K. and Hur, T.C. (2011). Relationship between climatic factors and the distribution of higher fungi in Byeonsanbando National Park, Korea, *Mycobiology*, 42, 27-33.
- Policelli, N., Horton, T. R., Hudon, A. T., Patterson, T. R., Bhatnagar, J.M. (2020). The Role of Ectomycorrhizal Fungi in Boreal and Temperate Forest Restoration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 1-15.
- Thomas, P. W. (2021). Ectomycorrhiza resilience and recovery to extreme flood events in *Tuber aestivum* and *Quercus robur*. *Mycorrhiza*, 31(4), 511-517.
- Trappe, J. M. (2005). A.B. Frank and mycorrhizae: The challenge to evolutionary and ecologic theory. *Mycorrhiza*, 15(4), 277-81.

เทคนิคการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นในตัวอย่างกาแฟโดยเครื่องสกัดด้วยเฟสของแข็งอัตโนมัติ

Sample preparation techniques for the determination of short-chain organic acids in coffee samples by the automated solid-phase extractor

ณัฐนรี รัตนคันทรัง¹, กานต์ธิดา คงแทน², พิสมัย ปิ่นศรีทอง¹, รุสนี กุลวิจิตร¹ และ ศักดิ์ชัยบดี ปิ่นศรีทอง^{1*}
Natnaree Rattanakunsong¹, Kantida Kongtan², Pisamai Pinsrithong¹,
Roosanee Kulvijitra¹ and Sakchaibordee Pinsrithong^{1*}

Received: 29 July 2023 ; Revised: 9 November 2023 ; Accepted: 6 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคเตรียมตัวอย่างเพื่อลดสารรบกวนก่อนการวิเคราะห์กรดอินทรีย์สายโซ่สั้น 6 ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดไอโซวาเลอริก และกรดวาเลอริกด้วยเครื่อง GC จากตัวอย่างกาแฟสกัดด้วยหม้อต้ม การเตรียมตัวอย่างใช้เมทานอลกับน้ำปราศจากไอออนเจือจางตัวอย่าง 5 เท่า แยกอนุภาคขนาดใหญ่ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วทำความสะอาดโดยเครื่องสกัดด้วยเฟสของแข็งอัตโนมัติ สภาวะที่ศึกษา ได้แก่ คาร์ทริดจ์ชนิด Sep-ed C18 อัตราในการไหล 0.1 mL/min และปริมาตรตัวอย่าง 5 mL ผลจากการศึกษาลักษณะกายภาพของตัวอย่างก่อนและหลังเตรียมตัวอย่างขนาดอนุภาคลดลงจาก $6.78 \pm 4.69 \mu\text{m}$ เป็น $1.40 \pm 0.74 \mu\text{m}$ ผลค่าสีความเป็นสีแดง สีเหลือง และดัชนีความเหลืองลดลง แต่มีค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$ ผลการศึกษาความใช้ได้ของวิธีได้ช่วงการวิเคราะห์ที่กว้างเพียงพอต่อการใช้งาน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (r) > 0.9997 ขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ในช่วง 2.5-10 mg/L ขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณอยู่ในช่วง 5-20 mg/L ร้อยละการได้กลับคืนอยู่ในช่วง 93.8 ± 3.6 ถึง 104.3 ± 1.8 และความเที่ยงในการทำซ้ำในช่วงร้อยละ 1.6-4.7 ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์การยอมรับ ทั้งนี้การวิเคราะห์ทางเคมีในเชิงคุณภาพด้วยเครื่อง GC-MS พบกลุ่มกรดอินทรีย์สัดส่วนร้อยละพื้นที่ใต้กราฟ 36.4-50.4 และการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยคำนวณต่อน้ำหนักเมล็ดกาแฟด้วยเครื่อง GC-FID พบปริมาณกรดอินทรีย์รวมในช่วง 3.08-7.92 g/kg

คำสำคัญ: เครื่องสกัดด้วยเฟสของแข็งอัตโนมัติ, กรดอินทรีย์โซ่สั้น, กาแฟ, แก๊สโครมาโทกราฟี

Abstract

The objective of this research was to study sample preparation techniques for reducing interference before analyzing six types of short-chain organic acids: acetic acid, propionic acid, isobutyric acid, butyric acid, isovaleric acid, and valeric acid, using gas chromatography (GC) from coffee samples brewed with a moka pot. The sample preparation used a fivefold dilution of the sample with methanol and deionized (DI) water, then separated the larger particles using a centrifuge, and cleaned the sample using an automated solid-phase extractor with Sep-ed C18 cartridges at a loading rate of 0.1 mL/min and sample volume of 5 mL. The results from the study of the physical characteristics of the samples before and after preparation showed a reduction in particle size from $6.78 \pm 4.69 \mu\text{m}$ to $1.40 \pm 0.74 \mu\text{m}$. The values for red color intensity, yellow color intensity, and yellowness index decreased, while brightness and whiteness index increased significantly with a statistical significance at $P < 0.05$. The method's usability yields an adequately broad analytical range, with a linear correlation coefficient (r) > 0.9997 . The detection limit was in the range of 2.5-10 mg/L, and the quantification limit was in the range of 5-20 mg/L. The recovery rate ranged from $93.8 \pm 3.6\%$

¹ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี 84100

¹ Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla 90110, Thailand

² Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, 84100, Surat Thani, Thailand

* Corresponding Author E-mail Address: Sakchaibordee.s@psu.ac.th

to 104.3±1.8% and the reproducibility was in the range of 1.6-4.7%, which was acceptable. Furthermore, the qualitative analysis using GC-MS identified the area under the graph ranging from 36.4% to 50.4% and the quantitative analysis, calculated per coffee bean weight, using of GC-FID revealed that the total content of organic acids to be in the range of 3.08-7.92 g/kg.

Keywords: Automate solid phase extractor, Short-chain fatty acids, coffee, gas chromatograph

บทนำ

ปัจจุบันการบริโภคกาแฟเป็นที่นิยมอย่างมากและแพร่หลายอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกาแฟสดหรือกาแฟคั่วบด ด้วยความต้องการที่สูงขึ้นกาแฟจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทย และมีแนวโน้มในการบริโภคเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Utrilla-Catalan *et al.*, 2022) คุณภาพกาแฟประกอบด้วยกลิ่น ความเข้มข้น รสชาติ และกลิ่นรสที่เหลือหลังจากการกลั่น ภายในเมล็ดกาแฟประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น คาเฟอีน ซึ่งเป็นสารที่ช่วยสร้างกลิ่นหอม รสชาติขม และกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่ทำให้กาแฟมีรสเปรี้ยว รสเปรี้ยวที่ไม่มากเกินไปเป็นคุณสมบัติที่ดีของกาแฟ เป็นต้น (Moon *et al.*, 2009) โดยชนิดและปริมาณของกรดในกาแฟที่แตกต่างกันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำหนดคุณภาพ ราคา และความนิยมของผู้บริโภคในท้องตลาด (Angeloni *et al.*, 2023) ซึ่งปริมาณของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันไปตามแต่ละสายพันธุ์กาแฟ รูปแบบการคั่ว วิธีการสกัดกาแฟ และเทคนิคการตรวจวัด (Yeager *et al.*, 2021) ที่ให้ช่วงการวิเคราะห์หรือความจำเพาะกับชนิดกรดอินทรีย์ในกาแฟที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาวิธีการตรวจวัดชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมกาแฟ โดยงานวิจัยนี้สนใจศึกษาชนิด และปริมาณกรดอินทรีย์สายโซ่สั้น (Short-chain fatty acids, SCFAs) (Sun *et al.*, 2020) ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ 6 ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทริก กรดบิวทริก กรดไอโซวาเลอริก และกรดวาเลอริก จากเมล็ดกาแฟที่ได้จากการสกัดด้วยหม้อต้มกาแฟ (Moka Pot) (Gianino, 2007) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้กาแฟหรือกาแฟเอสเปรสโซ่เข้มข้น และเป็นวิธีการสกัดที่ใช้อุปกรณ์ราคาประหยัด (Kaffe, 2023) โดยกรดอินทรีย์ที่สนใจศึกษาจัดเป็นกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ พบได้บ่อยในตัวอย่างน้ำกาแฟ โดยเฉพาะกรดอะซิติกซึ่งเป็นสารสำคัญที่แสดงรสเปรี้ยวของน้ำกาแฟ (Rune *et al.*, 2023) แต่เนื่องจากตัวอย่างน้ำกาแฟสกัดที่สกัดได้ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดนอกจากกรดอินทรีย์ที่ศึกษา เช่น คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล เซลลูโลส ลิกนิน โปรตีน น้ำมัน คาเฟอีน และกรดแทนนิก เป็นต้น (Saud & Salamatullah, 2021) ซึ่งสารประกอบที่สนใจคือกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดจัดเป็นองค์ประกอบส่วนน้อยในตัวอย่างกาแฟ (Ramalakshmi & Raghavan, 1999) ทำให้กระบวนการวิเคราะห์นั้นมีผลของสารรบกวนจากองค์ประกอบอื่น ๆ ส่งผลต่อการวิเคราะห์สารที่สนใจ

สารรบกวนหลายชนิดมีจุดเดือดค่อนข้างสูงทำให้ตกค้างบริเวณหัวฉีดสารกรณีใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นผลให้ไบนอร์และคอลัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเสื่อมสภาพการใช้งาน (Chun *et al.*, 2016) ดังนั้นจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อกำจัดสิ่งรบกวนออกจากตัวอย่างน้ำกาแฟก่อนวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของกรดอินทรีย์ที่สนใจ โดยเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่มีการศึกษาในการทดสอบน้ำกาแฟที่นิยมใช้ เช่น เทคนิคเฮดสเปซร่วมกับตัวดูดซับของแข็งปริมาณน้อย ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์สารกลุ่มให้กลิ่นจำพวกอัลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น โดยเทคนิคนี้สามารถสกัดลดสารรบกวนและทำความสะอาดสารที่สนใจไปพร้อมกัน (Yu *et al.*, 2021) แต่เทคนิคนี้ยังไม่เหมาะกับกลุ่มสารอินทรีย์ละลายได้ดีในตัวอย่างของกลุ่มกรดอินทรีย์ และนอกจากนี้เทคนิคที่มีการใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำกาแฟคือ เทคนิคการเซนตริฟิวซ์เพื่อแยกตะกอนหรือสารรบกวนออก (O'Driscoll, 2014) และเทคนิคการทำความสะอาดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (SPE) (Caprioli *et al.*, 2016) ซึ่งทั้งสองเทคนิคจะช่วยแยกตะกอนขนาดใหญ่ และลดสารรบกวนออกจากตัวอย่างกาแฟได้ตามลำดับ

สำหรับเครื่องมือที่นิยมใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างกาแฟ คือเครื่องมือกลุ่มโครมาโทกราฟี เช่น เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) (Rune *et al.*, 2023) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) (Jumhawan *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม HPLC นิยมใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์กึ่งระเหยหรือระเหยยาก (Jham *et al.*, 2002) จึงไม่เหมาะสมสำหรับกรวิเคราะห์กรดอินทรีย์สายโซ่สั้นที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 118 ถึง 185 °C (Raposo *et al.*, 2013) ดังนั้นเครื่อง GC จึงเหมาะสำหรับการตรวจวัดกรดอินทรีย์สายโซ่สั้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาการเตรียมตัวอย่างโดยการเจือจางตัวอย่างเพื่อลดสารรบกวนแล้วใช้เทคนิคเซนตริฟิวซ์เพื่อแยกตะกอน และสารรบกวนออกร่วมกับการศึกษาการทำความสะอาดตัวอย่างด้วยเครื่องสกัดด้วยเฟสของแข็งอัตโนมัติที่ช่วยลดเวลาในการเตรียมตัวอย่างของผู้ทดสอบซึ่งโดยปกติต้องใช้เวลามากกว่าครั้งในการเตรียมตัวอย่างต่อกระบวนการวิเคราะห์ทั้งหมด (Ronald E. Majors, 2013) และการกรองตัวอย่างอีกครั้งด้วยเมมเบรน ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC โดยศึกษาการสกัด การทำความสะอาด และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ด้วยเครื่อง GC ตัวตรวจวัดเฟลมไอออไนเซชัน (GC-FID) ที่มีจุดเด่นคือ ใช้งานง่าย ต้นทุนการวิเคราะห์และการบำรุงรักษาที่ไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับเครื่อง GC ตัวตรวจวัดชนิดแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) และเครื่องดังกล่าวมีในห้องปฏิบัติการพื้นฐานทั่วไป (St-Gelais, 2014) และวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย GC-MS เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์กรดอินทรีย์ด้วยแมสสเปกตรัมเทียบกับฐานข้อมูล (Library) ในตัวอย่างที่ผ่านการสกัด และผ่านการทำความสะอาดด้วยสภาวะที่เหมาะสม

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการศึกษา

1. สารมาตรฐาน สารเคมี

เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของ กรดอะซิติก และกรดโพทิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดไอโซวาเลอริก และกรดวาเลอริก (Alfa aesar, Massachusetts, U.S.) หรือ Short-chain fatty acids, SCFAs โดยจะเตรียมสารผสมกรดอินทรีย์เข้มข้น 5,000 mg/L ยกเว้นกรดอะซิติกจะเตรียมความเข้มข้น 10,000 mg/L เนื่องจากสัญญาณตอบสนองกับเครื่อง GC ของกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นเดียวกันน้อยกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งปริมาตรสารละลายที่เตรียมคือ 25 mL ในตัวทำละลายเมทานอล (Lab scan, Thailand) ต่อน้ำ (DI) สัดส่วนเท่ากันเป็นสารละลายสต็อก ก่อนเจือจางเพื่อการตรวจสอบประสิทธิภาพเครื่องมือ ทดสอบการใช้ได้ของวิธีและเป็นสารมาตรฐานในการทดสอบเชิงปริมาณ

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาทางเคมี สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ใช้ GC-FID รุ่น 7820 ยี่ห้อ Agilent ปริมาตรสารที่ฉีด 1 μ L อุณหภูมิหัวฉีด 240 °C สัดส่วนแบ่งสารทั้ง 1 : 5 คอลัมน์ HP-Innowax (30 m \times 0.32 mm \times 0.25 μ m) อุณหภูมิตู้อบเริ่มต้น 60 °C คงที่ 3 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้น 40 °C ต่อนาที จนได้ 140 °C คงที่ 1 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้นอีก 5 °C ต่อนาที จนได้ 160 °C คงที่ไว้ 2 นาที เวลาทดสอบทั้งหมด 12 นาที ไล่สารตกค้างอื่น ๆ หลังการวิเคราะห์ (Post run) ที่ 240 °C เป็นเวลา 10 นาที ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราไหล 1.5 mL/min อุณหภูมิตัวตรวจวัด 240 °C โดยอัตราไหลแก๊สเชื้อเพลิง (H_2) แก๊สออกซิแดนซ์ (Air zero) และ แก๊ส Make up (N_2) เท่ากับ 30 mL/min, 300 mL/min และ 25 mL/min ตามลำดับ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพจะศึกษาองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่สภาวะการทดสอบเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ของเครื่อง GC-FID โดยใช้เครื่อง GC-MS ยี่ห้อ Agilent โดย GC รุ่น 7890 และ MS รุ่น 5977B โดยใช้โปรแกรม Method translation ที่ติดตั้งอยู่ในโปรแกรม MassHunter B.07.06.2704 ของเครื่อง GC-MS แปลงค่าสภาวะการทดสอบของเครื่อง GC-FID ส่วนของระบบ GC เป็นสภาวะการทดสอบ

ของเครื่อง GC-MS โดยกำหนดค่าความเร็วการวิเคราะห์ (Speed gain) เท่ากับ 1 ซึ่งสภาวะการทดสอบของเครื่อง GC-MS ที่ได้ คือปริมาตรสารที่ฉีด 1 μ L อุณหภูมิหัวฉีด 240 °C สัดส่วนแบ่งสารทั้ง 1 : 25 คอลัมน์ VF-WaxMS (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m) อุณหภูมิตู้อบเริ่มต้น 60 °C คงที่ 3 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้น 40 °C ต่อนาที จนได้ 140 °C คงที่ 1 นาที เพิ่มขึ้นอีก 5 °C ต่อนาที จนได้ 160 °C คงที่ไว้ 2 นาที เวลาทดสอบ 12 นาทีและ Post run 240 °C เป็นเวลา 10 นาที ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราไหล 0.9 mL/min อุณหภูมิเชื่อมต่อ (Transfer Line) 240 °C สภาวะเครื่อง MS แหล่งกำเนิดแมส (MS source) เท่ากับ 230 °C เริ่มเก็บข้อมูลแมสที่ 5 นาทีตั้งแต่ช่วงมวล 35 m/z ถึง 500 m/z สำหรับผลข้อมูลที่ได้แต่ละแมสพีคจะนำไประบุชนิดสารประกอบโดยเทียบกับฐานข้อมูล Wiley เวอร์ชัน 10 และ NIST เวอร์ชัน 14

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างก่อนและหลังการเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ ขนาดอนุภาคโดยจะศึกษาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคและการกระจายตัว (LPSA) รุ่น LS 230 ยี่ห้อ Beckman Coulter และภาพถ่าย 3 มิติของตัวอย่างศึกษาด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ รุ่น Leica M205 ยี่ห้อ Leica โดยการถ่ายภาพจะหยุดตัวอย่างก่อนและหลังการเตรียมตัวอย่างปริมาตรเท่ากันคือ 50 μ L ลงบนพลาสติกใส

ศึกษาวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างก่อนและหลังการเตรียมตัวอย่างในโหมดส่องผ่าน โดยใช้เครื่องวัดสีแบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Color Spectrophotometer) รุ่น UltraScan Pro ยี่ห้อ HunterLab จากนั้นนำค่าสีที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีในแต่ละหน่วยวัด โดยใช้การทดสอบ t-test: two-sample assuming equal variances ในโปรแกรม Microsoft excel (Microsoft, 2023) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$) เพื่อประเมินความแตกต่างของค่าสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-FID

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อให้ได้สภาวะในการแยกและการตรวจวัดที่ดีที่สุด ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่อุณหภูมิหัวฉีด ซึ่งอุณหภูมิหัวฉีดที่เหมาะสมจะต้องให้สารที่ต้องการวิเคราะห์กลายเป็นไอทั้งหมด แต่อุณหภูมิต้องต่ำกว่าอุณหภูมิจำกัดของคอลัมน์ ดังนั้นการตั้งค่าอุณหภูมิควรให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ไม่มากหรือน้อยเกินไป (Hassan *et al.*, 2021) และอุณหภูมิตัวตรวจวัด ซึ่งเป็นอุณหภูมิของตัวตรวจวัดต้องมีค่ามากกว่าจุดเดือดของสารที่วิเคราะห์ โดยในการศึกษาจะเจือจางสารละลายสต็อก 100 เท่า ฉีดเข้าสู่เครื่อง GC-FID ช่วงอุณหภูมิหัวฉีดสารที่ศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิ 120-240 °C และ ช่วงอุณหภูมิตัวตรวจวัดของ GC-FID ที่ศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิ 200-250 °C

4. การศึกษาการทำความสะอาดด้วยเครื่องสกัดโดยเฟสของแข็งอัตโนมัติ (Auto SPE)

โดยในการศึกษาการทำความสะอาดตัวอย่างและแยกสารที่ไม่ต้องการทดสอบออกจากตัวอย่างจะใช้เครื่อง Auto SPE แขนกลอัตโนมัติเคลื่อนที่ได้แนวแกน X Y Z รุ่น Freestyle SPE ยี่ห้อ LCTECH โดยในการศึกษาจะเจือจางสารละลายสต็อก 100 เท่า เพื่อศึกษาหาชนิดตัวสกัดเฟสของแข็งที่เหมาะสม ได้แก่ ชนิดเหมาะกับสารมีขั้วสูงคือ HyperSep FL (Thermo fisher scientific, USA) และชนิดเหมาะกับสารขั้วต่ำถึงสูง คือ Strata-X (Phenomenex, USA) และ Spe-ed C18 (Applied separations, USA) (Sciences, 2023) ปรับสภาวะก่อนใช้งานด้วยเมทานอล 5 mL จากนั้นศึกษาอัตราการไหลตัวอย่างผ่านตัวสกัดเฟสของแข็ง โดยไหลตัวอย่างด้วยอัตราไหลผ่านที่ต่างกัน ตั้งแต่อัตราต่ำสุดที่สามารถกำหนดด้วยเครื่อง Auto SPE คือ 0.1-1.3 mL/min และสุดท้ายศึกษาปริมาณในการไหลตัวอย่าง โดยใช้สารมาตรฐานไหลผ่านตัวสกัดเฟสของแข็งด้วยปริมาตรที่ต่างกัน ตั้งแต่ 1-9 mL ก่อนไล่ด้วยอากาศปริมาตร 6 mL ให้แห้ง โดยทุกการศึกษาจะคงที่ค่าปัจจัยที่ไม่ได้ศึกษาและเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ศึกษา เมื่อได้ปัจจัยที่ดีที่สุด จะคงที่ปัจจัยนั้นไว้และเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ศึกษาถัดไป รายงานค่าในรูปแบบร้อยละการได้กลับคืนของการสกัด (%Recovery, %RR)

5. การศึกษาความใช้ได้ของวิธี (Method validation)

5.1 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง (Calibration curve) โดยเจือจางจากสารละลายสต็อกข้อ 1 จำนวน 11 ระดับความเข้มข้นทั้งหมด ได้แก่ 5,000, 2,500, 1,250, 500, 250, 100, 40, 20, 10, 5 และ 2.5 mg/L ในตัวทำละลายเมทานอลต่อ DI สัดส่วน 5 : 1 (กรดอะซิติกจะมีความเข้มข้นสูงเป็น 2 เท่า) ฉีดแต่ละความเข้มข้นสู่เครื่อง GC-FID จำนวน 3 ซ้ำต่อความเข้มข้น จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นและสัญญาณตอบสนอง

5.2 ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ศึกษาโดยการเจือจางสารละลายสต็อก 50 เท่า ให้ได้ความเข้มข้น 100 mg/L จากนั้นเจือจางอีก 5 ระดับความเข้มข้นคือ 40, 20, 10, 5 และ 2.5 mg/L (กรดอะซิติกจะมีความเข้มข้นสูงเป็น 2 เท่า) ในตัวทำละลายเมทานอลต่อ DI สัดส่วน 5 : 1 โดยความเข้มข้นต่ำสุดของกรดอินทรีย์แต่ละชนิดที่ให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) มากกว่าหรือเท่ากับ 3 และ 10 จะกำหนดให้เป็น LOD และ LOQ ตามลำดับ (ICH, 2006)

5.3 ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) โดยความแม่นยำ แสดงถึงความใกล้เคียงของผลการทดสอบต่อค่าจริง เป็นตัววัดว่าผลวิเคราะห์แต่ละค่าอยู่ใกล้ค่าจริงมากน้อย

แค่ไหน แสดงได้ด้วย %RR ซึ่งเป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของวิธีที่มีต่อสารที่สนใจในตัวอย่าง ทำได้โดยการนำตัวอย่างน้ำหนักแห้งเข้มข้น เติมสารละลายมาตรฐานลงไปที 2 ระดับความเข้มข้นตามความเข้มข้นที่ตรวจพบในตัวอย่างจริง ซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นที่เติมจะเจือจางสารละลายสต็อก 100 เท่า และ 50 เท่า กำหนดเป็น Level 1 และ Level 2 ตามลำดับ นำมาเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบตามข้อ 6.2 เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างจริง ในหัวข้อที่จะกล่าวถัดไป จากนั้นคำนวณค่า %RR โดยคำนวณจากร้อยละความเข้มข้นที่เติมสารมาตรฐานรวมกับความเข้มข้นสารที่สนใจวิเคราะห์ในตัวอย่างที่มีอยู่เดิม (C_{spike}) ลบด้วยค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ของสารที่สนใจในตัวอย่างที่ไม่มีการเติมสารละลายมาตรฐาน ($C_{unspike}$) หารด้วยค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไป (ตัวอย่าง C_{add}) การศึกษาจะทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง ทุกครั้งของแต่ละความเข้มข้นจะฉีดสารสู่เครื่อง GC-FID 3 ซ้ำ

ผลการวิเคราะห์ค่า %RR ถูกนำมาประเมินความแตกต่างทางสถิติในสองขั้นตอน โดยใช้ ANOVA: single factor สำหรับเปรียบเทียบสารประกอบทั้ง 6 ชนิดที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน และใช้ t-test สำหรับเปรียบเทียบค่าใน 2 ระดับความเข้มข้นของสารประกอบชนิดเดียวกัน การวิเคราะห์ทั้งหมดดำเนินการด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่าง และสำหรับความเที่ยงที่แสดงถึงความใกล้เคียงกันของผลการวิเคราะห์ซ้ำภายใต้สภาวะที่เดียวกัน ระบุความเที่ยงในรูปแบบของร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของตัวอย่าง C_{spike} โดยศึกษาที่ความเข้มข้นเดียวกับความแม่นยำ

6. การวิเคราะห์ตัวอย่างจริง

การสกัดและวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ในตัวอย่างกาแฟเข้มข้นจะเลือกศึกษาตัวอย่างเมล็ดกาแฟที่จำหน่ายในประเทศไทยและระบบบนฉลากบรรจุภัณฑ์เป็นเมล็ดกาแฟคั่วกลาง (medium) ศึกษาจำนวน 5 ยี่ห้อ ตัวอย่างที่ 1-5 (S1-S5) โดยตัวอย่างที่สุ่มเลือกเป็นตัวอย่างที่ซื้อผ่านช่องทางออนไลน์ในประเทศไทย นำมาเตรียมตัวอย่างทดสอบ คำนวณผลการวิเคราะห์ ดังนี้

6.1 เตรียมตัวอย่างน้ำหนักแห้งสกัด การเตรียมตัวอย่างน้ำหนักแห้งสกัด (Figure 1(A)) ทำได้โดยการชั่งเมล็ดกาแฟคั่วประมาณ 30.0 g บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน แล้วมาบดด้วยเครื่องบดกาแฟ รุ่น SN7820 ยี่ห้อ ETZEL เป็นเวลา 20 วินาที จำนวน 2 รอบ โดยสัดส่วนน้ำหนักของเมล็ดกาแฟต่อผงกาแฟบดเท่ากับ 1:1 จากนั้นนำผงกาแฟบดไปสกัดด้วยหม้อต้มกาแฟ โดยการต้มจะเติมน้ำ 120 mL ลงในหม้อต้ม จากนั้นให้ความร้อนด้วยเปลวไฟ อุณหภูมิภายนอกหม้อต้มประมาณ 93-98 °C รอจนเดือดหมดได้น้ำกาแฟเข้มข้น แบ่ง

น้ำกาแฟที่ได้ใส่ขวดแก้วฝาปิดสนิท จัดเก็บไว้ในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 °C เพื่อรอการนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป

6.2 การเจือจาง แยกตะกอนและการทำความสะอาดด้วยเครื่อง Auto SPE กระบวนการเตรียมตัวอย่าง (Figure 1(B)) โดยใช้ตัวอย่างน้ำกาแฟเข้มข้น 5 mL นำมาเจือจางลดสารรบกวนก่อนทดสอบด้วยเมทานอล (HPLC grade, Lab scan, Thailand) กับน้ำ DI โดยสารอินทรีย์ที่ละลายและเจือจางจะเลือกจากคุณสมบัติการผสมและเข้ากันได้กับน้ำ (Interchim, 2023) สัดส่วนเท่ากันปริมาตรรวม 10 mL เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 25 mL ด้วยเมทานอลในขวดวัดปริมาตร ก่อนนำไปแยกตะกอนเอาอนุภาคขนาดใหญ่ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง รุ่น Velocity 14R ยี่ห้อ Dynamica ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนใสปริมาตร 10 mL มาแบ่งใส่ขวดเก็บสารขนาด 22 mL นำไปวางในเครื่อง Auto SPE โหลดตัวอย่างปริมาตร 5 mL ที่อัตราการไหล 0.1 mL/min ผ่านคาร์ทริดจ์ชนิด Sep-ed C18 หลังได้ตัวอย่างน้ำกาแฟสกัดแล้วและผ่านการทำความสะอาด นำไปกรองต่อด้วยตัวกรองเมมเบรน 0.22 µm (Nylon Syringe Filters) แล้วแบ่งใส่ขวดฉีดสาร เพื่อศึกษาองค์ประกอบด้วยเครื่อง GC-MS และวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเครื่อง GC-FID ต่อไป

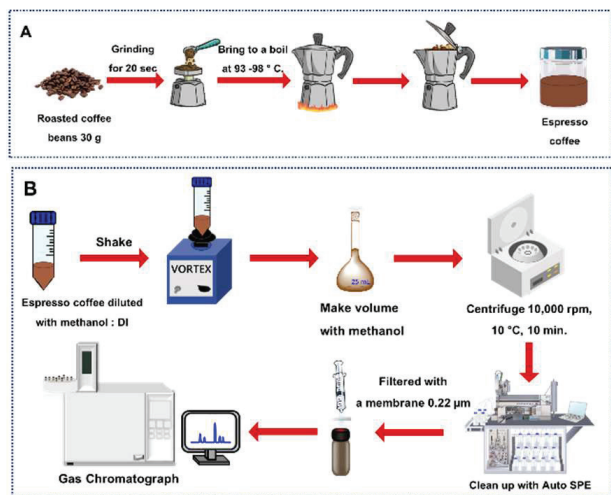


Figure 1 (A) Roasted coffee beans extraction with a moka pot (B) Sample preparation espresso coffee with auto SPE

6.3 คำนวณผลการวิเคราะห์ การคำนวณปริมาณกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยหม้อต้มกาแฟ และผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการที่ศึกษา ก่อนนำไปฉีดเข้าสู่เครื่อง GC-FID เพื่อคำนวณเป็นความเข้มข้นของกรดอินทรีย์แต่ละชนิดต่อหน้าหน้ากาแฟที่ใช้ด้วยสมการที่ 1

$$C_s = \frac{C_{curve} \times V_{dis} \times V_{water}}{V_{sample} \times W_{sample} \times 1000} \dots\dots\dots\text{สมการที่ 1}$$

C_s คือ ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ หน่วย g/kg
 C_{curve} คือ ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ที่ได้จากการเทียบกับสมการเส้นตรง หน่วย mg/L
 V_{dis} คือ ปริมาตรการละลายทั้งหมดได้แก่ ปริมาตรตัวอย่างน้ำกาแฟเข้มข้นและปริมาตรตัวทำละลายเจือจาง หน่วย mL
 V_{sample} คือ ปริมาตรน้ำกาแฟเข้มข้น หน่วย mL
 V_{water} คือ ปริมาณน้ำ ที่เติมลงในหม้อต้ม หน่วย L
 W_{sample} คือ น้ำหนักเมล็ดกาแฟที่ใช้ หน่วย kg

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-FID

ผลการศึกษาอุณหภูมิหัวฉีดสารและตัวตรวจวัดพบว่า สัญญาณจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิหัวฉีดสัญญาณเฉลี่ยจะคงที่ ที่ 180 °C เป็นต้นไป แต่ค่า %RSD จะน้อยลง (< 5.3%) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 220 °C เป็นผลจากการกลายเป็นไอสมบูรณ์ของกรดอินทรีย์ ในขณะที่อุณหภูมิตัวตรวจวัดสัญญาณจะสูงขึ้นจนถึง 240 °C จากนั้นจะคงที่ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมของทั้งหัวฉีดสารและตัวตรวจวัดจะเลือกเหมือนกันที่ 240 °C ทั้งสองพารามิเตอร์ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้สัญญาณการตอบสนองกับกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดที่สูงมีความเที่ยงที่ดี และค่าอุณหภูมิที่เลือกไม่เกินขีดจำกัดของคอลัมน์ (ขีดจำกัดคอลัมน์ < 270 °C) และการเลือกใช้อุณหภูมิสูงโดยเฉพาะส่วนของหัวฉีดจะลดการปนเปื้อนต่อการฉีดสารครั้งถัดไป (Carry over) ได้ดี ผลการศึกษากการแยกของกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดด้วยสภาวะที่กำหนดแสดงโครมาโทแกรมของการแยกชัดเจน (Figure 2) เวลาสารถูกหน่วงอยู่ในคอลัมน์ (Retention time) อยู่ในช่วง 6.50-9.00 นาที โดยลำดับการออกจากคอลัมน์สอดคล้องตามจุดเดือดของกรดอินทรีย์แต่ละชนิด (Rosmalina *et al.*, 2020) โดยโครมาโทแกรมที่ได้ แสดงพีคสัญญาณแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน ค่าประสิทธิภาพทางโครมาโทกราฟ ความสมมาตร (Symmetry) ของสัญญาณของพีค มีลักษณะเป็นหางทางด้านหลัง (Tailing peak) ดัง Figure 2 นอกจากนี้ค่าการแยก (Resolution) ซึ่งแสดงการแยกของพีคแต่ละชนิดมีค่าตั้งแต่ 5.02-14.21 แสดงถึงการแยกของพีคสารกับพีคก่อนหน้า ออกจากกันอย่างชัดเจน และมีค่าการแยกมากกว่า 1.5 แสดงถึงการแยกที่ดีไม่มีการซ้อนทับกันของพีคแต่ละชนิดที่ศึกษา (Shimadzu, 2018)

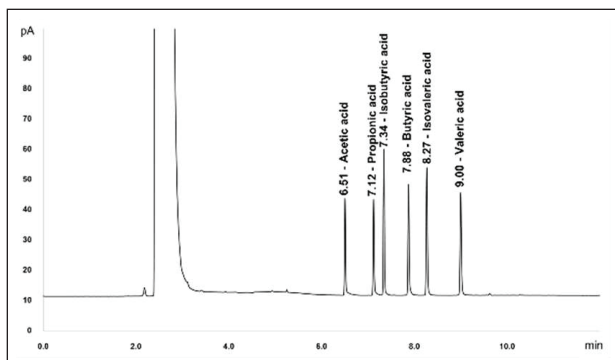


Figure 2 Chromatogram of a mixture of organic acids under optimization GC-FID

2. ผลการศึกษาการทำความสะอาดด้วย Auto SPE

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อลดผลสารรบกวน และลดอนุภาคขนาดใหญ่ที่จะมีผลต่อเครื่อง GC แสดงผลการศึกษาที่ได้ดังนี้

ผลการศึกษาชนิดของคาร์ทริดจ์ที่เหมาะสมกับสารที่สนใจวิเคราะห์ จากการศึกษ (Figure 3(A)) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าคาร์ทริดจ์ชนิด Spe-ed C18 ค่า %RR สารประกอบกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดสูงสุด คืออยู่ในช่วงร้อยละ 58.8 ± 3.5 ถึง 65.9 ± 3.4 เนื่องจากตัวดูดซับชนิดนี้มีชีวิตต่ำ (Walker & Mills, 2002) ปลดปล่อยสารที่สนใจวิเคราะห์ ที่มีชีวิตออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับคาร์ทริดจ์ชนิดอื่นที่ศึกษา เหมาะกับนำไปทำความสะอาดก่อนการวิเคราะห์ สามารถยึดจับสารรบกวนกลุ่มชีวิตอื่น ๆ ได้ดี เช่น น้ำมัน ที่อยู่ในตัวอย่าง น้ำกาแฟได้ดี ด้วยสภาพชีวิตเดียวกันกับสารรบกวน และปลดปล่อยสารที่สนใจวิเคราะห์ออกมา

ผลการศึกษาลำดับถัดไป อัตราในการไหลลดสารที่สนใจด้วยเครื่อง Auto SPE (Figure 3(B)) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราในการไหลลดตัวอย่าง 0.1 mL/min และเป็นอัตราไหลต่ำสุดที่สามารถกำหนดได้ของ Auto SPE แสดง %RR กรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการศึกษาก่อนหน้า และแสดง %RR อยู่ในช่วงร้อยละ 93.2 ± 4.5 ถึง 100.3 ± 4.8 เนื่องจากเป็นอัตราในการไหลลดตัวอย่างที่ช้า ตัวดูดซับจะปล่อยกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดแบบสมดุลได้ดีกว่าอัตราในการไหลลดตัวอย่างที่เร็ว

ผลการศึกษาปริมาตรตัวอย่างที่เหมาะสม (Figure 3(C)) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาตรตัวอย่างเพิ่มขึ้น %RR ก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงปริมาตรในการไหลลด 5 mL %RR ที่ได้มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงเลือกปริมาตรในการไหลลดตัวอย่าง 5 mL เป็นปริมาตรที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นปริมาณที่ไม่เยอะจนเกินไป และลดเวลาการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับปริมาตรในการไหลลดที่ 7 mL และ 9 mL และยังให้ค่าความแม่นยำและความเที่ยงที่ดี โดยมีค่า %RR ของการสกัดสารประกอบกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดอยู่ในช่วงร้อยละ 94.9 ± 3.9 ถึง 104.2 ± 4.9

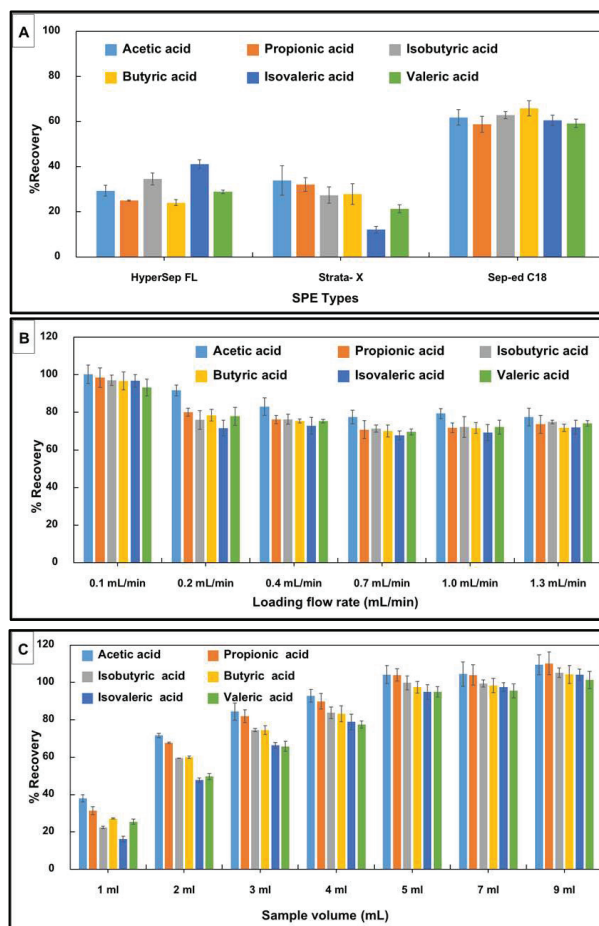


Figure 3 Comparison of the extraction recovery using (A) SPE Types (B) Loading flow rate (C) Sample volume (n=3)

3. ผลการศึกษาลักษณะกายภาพของตัวอย่าง

เนื่องจากในตัวอย่างน้ำกาแฟสกัดประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด และยังมีส่วนประกอบที่สกัดได้มีขนาดอนุภาคที่ขนาดใหญ่เกินไปสำหรับการฉีดโดยตรงเข้าสู่เครื่อง GC (Angeloni *et al.*, 2023) ซึ่งอนุภาคที่ขนาดใหญ่เกินไปนี้ไม่สามารถที่จะกรองอย่างง่ายด้วยชุดกรองเมมเบรนขนาด 0.22 µm เพื่อไปทดสอบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสม เพื่อแยกเฉพาะสารที่สนใจคือกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นออกมา ผลจากการศึกษาทางกายภาพ การศึกษาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง LPSA (Figure 4) ตัวอย่างน้ำกาแฟ (ตัวอย่างที่ 5) ก่อนการเตรียมตัวอย่าง แสดงผลของค่าอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.78 µm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 4.69 µm ค่ากลาง (Median, d₅₀) เท่ากับ 5.99 การกระจายของขนาดอนุภาคที่ตรวจพบตั้งแต่ 0.040 ถึง 27.39 µm และหลังการเตรียมตัวอย่างตาม Figure 1(B) ก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง GC แสดงค่าอนุภาคเฉลี่ยลดลงเหลือ 1.40 µm, SD เท่ากับ 0.74 µm, d₅₀ เท่ากับ 1.13 µm การกระจายของขนาดอนุภาคที่ตรวจพบตั้งแต่ 0.28 ถึง 3.21 µm ซึ่งผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ผ่านการเตรียม

ด้วยวิธีการที่นำเสนอเมื่อเทียบกับก่อนการเตรียม ขนาดอนุภาคของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาค และผลการศึกษจากการใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอถ่ายภาพ (Figure 5) ซึ่งแสดงให้เห็นชัดว่าตัวอย่างก่อนการเตรียมตัวอย่าง แสดงภาพถ่ายสีเข้มสูงกว่าตัวอย่างหลังการเตรียมตัวอย่าง

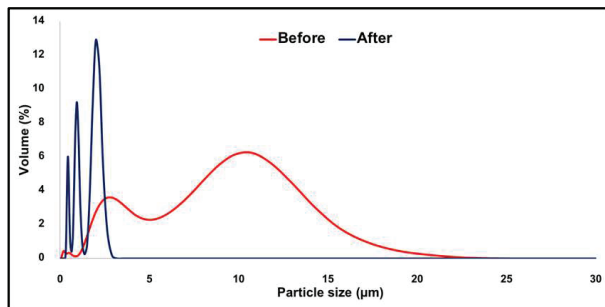
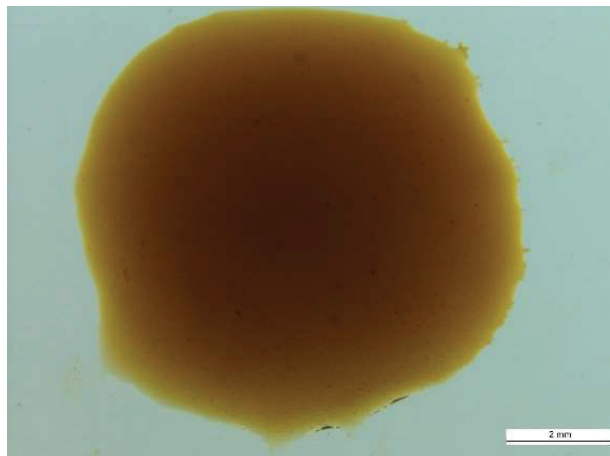


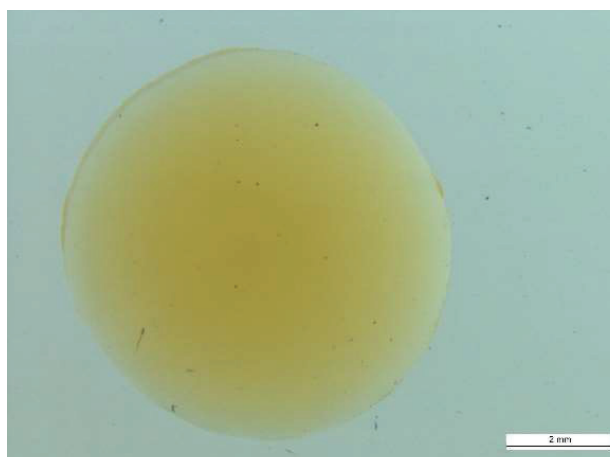
Figure 4 Comparison of LPSA measurements in different particle size (—) before and (—) after sample preparation espresso coffee

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาค่าสีด้วยเครื่องวัดสีแบบสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของตัวอย่างน้ำกาแฟตัวอย่างเดียวกัน (Table 1) ซึ่งค่าสีแสดงความสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ดูดกลืนแสงได้ จากผลการทดสอบที่ได้ ค่า L^* คือค่าความสว่าง (Brightness) ซึ่งผลที่ได้ของตัวอย่างหลังการเตรียมมีค่าสีแสดงความสว่างมากกว่าตัวอย่างก่อนการเตรียม และสอดคล้องกับค่า WI [D65/10] คือค่าดัชนีความขาว ณ สภาวะแหล่งกำเนิดแสง (Illuminant) D65 และมุมมองผู้สังเกตการณ์ (Observer) 10 องศา โดยตัวอย่างหลังเตรียมแสดงค่าความขาวมากกว่าตัวอย่างก่อนการเตรียม แสดงถึงการลดลงของสารอินทรีย์รบกวนที่ได้กำจัดไปผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่าง ค่า a^* ที่ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว ค่า b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ค่า YI [D65/10] คือ ค่าดัชนีความเหลือง ณ สภาวะแหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมมองผู้สังเกตการณ์ 10 องศา ผลการทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย

ที่ได้ของตัวอย่างหลังการเตรียมจะมีค่าความเป็นสีแดงและสีเหลือง ดัชนีความเหลืองน้อยกว่าตัวอย่างก่อนการเตรียมและมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$ แสดงถึงตัวอย่างหลังการเตรียมมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีหมู่โครโมฟอร์ดูดกลืนแสงได้ดี อยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าตัวอย่างก่อนการเตรียม (Yeager *et al.*, 2022)



(A)



(B)

Figure 5 Comparison of Stereo microscope (A) before and (B) after sample preparation coffee

Table 1 $L^*a^*b^*$ WI * YI Color values obtained from before and after sample preparation (n=5)

Sample Prep.	Before	After
L^*	22.8±0.0 ^a	23.2±0.0 ^b
a^*	3.5±0.0 ^a	1.1±0.0 ^b
b^*	4.3±0.0 ^a	0.2±0.0 ^b
WI	-50.2±0.4 ^a	1.68±0.2 ^b
YI	30.1±0.2 ^a	3.4±0.1 ^b

^{a, b}=different letters indicate statistically significant differences (p<0.05) within the same row by t-test

4. ผลการศึกษาความใช้ได้ของวิธี

ผลการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของการวัดของกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิด (Table 2) กรดอินทรีย์ทุกสารประกอบแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (*r*) ที่ได้จากโปรแกรม Chem station ที่เป็นซอฟต์แวร์คำนวณผลการวิเคราะห์ของเครื่อง GC (Agilent, 2009) อยู่ในช่วง 0.99972-0.99999 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ดีคือมากกว่า 0.99 ตามเกณฑ์การยอมรับอ้างอิงของ AOAC (AOAC, 2002) และกรดอินทรีย์ทั้ง 6 ชนิดให้ช่วงการวิเคราะห์ที่กว้าง ซึ่งหากคำนวณผลการวิเคราะห์ตามหัวข้อวิธีการศึกษาข้อ 6 จะได้ช่วงการวัดของวิธีคือกรดอะซิติกมีช่วงความเข้มข้น 0.4-200 g/kg กรดโพรพิโอนิกมีช่วงความเข้มข้น 0.2-100 g/kg และกรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดไอโซวาเลอริก และกรดวาเลอริก มีช่วงความเข้มข้น 0.1-100 g/kg ซึ่งมีค่าเพียงพอต่อการใช้งาน

สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่มีการรายงานในวารสารทบทวนวรรณกรรมก่อนหน้า ซึ่งรายงานกรดอะซิติกที่ตรวจพบในโรบัสต้าและอราบิก้าน้อยกว่า 5 และ 70 g/kg ตามลำดับ (Yeager *et al.*, 2021) และจากการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่ให้สัญญาณของสารต่อสัญญาณรบกวน (S/N) มากกว่าหรือเท่ากับ 3 และ 10 เพื่อใช้ในการคำนวณค่า LOD และ LOQ ตามลำดับ (Table 2) และคำนวณผลการวิเคราะห์ของวิธีตามหัวข้อวิธีการศึกษาในข้อ 6 จะได้ค่า LOD และ LOQ ต่อนำหนักตัวอย่าง ของกรดอะซิติกเท่ากับ 0.2 g/kg และ 0.4 g/kg กรดโพรพิโอนิกที่มีค่าเท่ากับ 0.1 g/kg และ 0.2 g/kg ตามลำดับ และกรดอินทรีย์ 4 ชนิด มีค่าเท่ากับ 0.05 g/kg และ 0.1 g/kg ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอสำหรับตรวจวัดกรดอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำกาแฟตามที่มีการรายงานก่อนหน้า (Rune *et al.*, 2023)

Table 2 Analytical performance of the method for the determination of SCFAs (n=3)

No.	RT (min)	SCFAs	Linearity (mg/L)	Calibration curve	R	LOD (mg/L)	LOQ (mg/L)
1	6.51	Acetic acid	20-10,000	y=2.82x-115.17	0.99999	10	20
2	7.12	Propionic acid	10-5,000	y=5.35x-89.19	0.99990	5	10
3	7.34	Isobutyric acid	5-5,000	y=5.35x-94.57	0.99991	2.5	5
4	7.88	Butyric acid	5-5,000	y=5.80x-107.12	0.99990	2.5	5
5	8.27	Isovaleric acid	5-5,000	y=6.63x-182.56	0.99972	2.5	5
6	9.00	Valeric acid	5-5,000	y=6.54x-158.65	0.99979	2.5	5

จากการประเมินความแม่นยำในรูปแบบ %RR และความเที่ยงในรูปแบบ %RSD ของสารมาตรฐานที่เติมลงไป ในตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 5) และนำไปสกัดและแยกตะกอนก่อนทดสอบ จากนั้นไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง Auto SPE (Figure 1(B)) แสดงค่าความแม่นยำของการวัดของวิธีที่ศึกษาให้ค่า %RR (Table 3) ที่ได้ของทั้ง 6 สารประกอบมีค่าเฉลี่ย Level 1 ช่วง 95.3 ± 4.7 ถึง 104.3 ± 1.8 และ Level 2 ช่วง 93.8 ± 3.6 ถึง 97.7 ± 2.1 ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ *P* > 0.05 โดยมีความเที่ยงในรูปแบบ %RSD ของทั้ง 6 สารประกอบ Level 1 อยู่ในช่วงร้อยละ 2.0-4.6 Level

2 อยู่ในช่วงร้อยละ 1.6-4.7 ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการเจือจาง แยกตะกอน และทำความสะอาดด้วยเครื่อง Auto SPE ที่นำเสนอ ช่วยลดขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ที่อาจอุดตันไลเนเนอร์หรือคอลัมน์ ลดผลของสารรบกวนจากค่าสีที่เปลี่ยนไป และแสดงให้เห็นความแม่นยำและความเที่ยงที่ดีในการวิเคราะห์ ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์การยอมรับอ้างอิงจาก AOAC ซึ่งความแม่นยำ (%RR) อยู่ใน ช่วงร้อยละ 90-107 และมีความเที่ยง (%RSD) น้อยกว่า 5.3 ที่ระดับความเข้มข้นที่ใช้ศึกษา 100 mg/L (AOAC, 2016)

Table 3 Accuracy (% RR) and precision (% RSD) of sample preparation for determination of SCFAs (n=2)

SCFAs	Level 1		Level 2	
	%RR \pm SD	%RSD	%RR \pm SD	%RSD
Acetic acid	95.3 \pm 4.7 ^{1a}	2.0	96.7 \pm 2.5 ^{2a}	2.3
Propionic acid	104.3 \pm 1.8 ^{1b}	4.5	97.7 \pm 2.1 ^{2b}	4.7
Isobutyric acid	99.7 \pm 3.4 ^{1c}	3.8	96.7 \pm 4.3 ^{2c}	1.6
Butyric acid	96.9 \pm 3.3 ^{1d}	4.6	94.3 \pm 2.0 ^{2d}	3.2
Isovaleric acid	95.5 \pm 4.0 ^{1e}	3.4	96.2 \pm 2.1 ^{2e}	3.9
Valeric acid	97.0 \pm 1.6 ^{1f}	3.5	93.8 \pm 3.6 ^{2f}	4.1

Different numbers and superscript letters for %RR indicate statistically significant differences ($p < 0.05$) within columns (compounds) and rows (concentrations) as determined by ANOVA and t-test respectively.

5. ผลการการศึกษาตัวอย่างน้ำกาแฟสกัด

การศึกษาด้วย GC-MS แสดงดัง Table 4 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าเมล็ดกาแฟสกัดทั้ง 5 ยี่ห้อเมื่อองค์ประกอบหลักที่สามารถระบุชนิดสารประกอบได้เหมือนกัน คือกรดอะซิติกที่เป็นสารให้รสเปรี้ยวในกาแฟ (Yeager *et al.*, 2023) แสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใต้กราฟเมื่อเทียบกับในแต่ละตัวอย่างคือมีสัดส่วนร้อยละ 27.1-34.3 ร้อยละพื้นที่ใต้กราฟสูงเป็นอันดับสองคือ เฟอร์ฟูริลแอลกอฮอล์ (2-Furanmethanol) สัดส่วนร้อยละ 10.3-23.9 โดยเป็นสารให้รสขม เหม็นเขียว ใหม่ที่พบมากในกาแฟคั่วถึงคั่วระดับกลาง (Cerny *et al.*, 2021)

และหากคิดเฉพาะกลุ่มกรดอินทรีย์จะได้สัดส่วนร้อยละพื้นที่ใต้กราฟรวม 36.4-50.4 นอกจากนี้หากแยกตามชนิดกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ของทั้ง 5 ตัวอย่างที่ศึกษา กลุ่มที่ตรวจพบเรียงตามลำดับมากไปน้อยคือ กลุ่มกรดอินทรีย์ กลุ่มฟิวแรน กลุ่มคีโตน และ กลุ่มฟีนอล สัดส่วนร้อยละพื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ยที่พบคือ 41.0 ± 5.6 , 21.3 ± 5.5 , 9.1 ± 2.8 และ 1.1 ± 0.5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการเตรียมตัวอย่างที่นำเสนอสามารถสกัดกรดอินทรีย์ได้สูงสุดสอดคล้องตามจุดประสงค์การวิเคราะห์

Table 4 Qualitative chemical components of the extract coffees with GC-MS

No.	RT (min)	Compound Name	Groups	CAS#	Area %				
					S1	S2	S3	S4	S5
1	5.62	2-Propanone, 1-hydroxy-	Ketone	116-09-6	8.8	2.8	2.7	10.3	4.6
2	6.58	Acetic acid	Acid	64-19-7	34.3	28.8	27.1	28.7	30.1
3	6.68	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	Ketone	592-20-1	nf	3.9	nf	nf	2.4
4	6.76	2-furan-carboxaldehyde	Furan	98-01-1	2.1	2.8	3.1	5.4	2.2
5	7.10	Ethanone, 1-(2-furyl)-	Furan	1192-62-7	nf	0.4	0.4	0.2	0.4
6	7.14	Formic acid	Acid	64-18-6	3.3	nf	nf	2.5	2.5
7	7.25	Propionic acid	Acid	79-09-4	4.6	4.2	4.1	4.4	4.2
8	7.50	Isobutyric acid	Acid	79-31-2	3.1	0.9	0.8	nf	nf
9	7.69	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	Furan	620-02-0	0.9	0.7	0.4	3.0	1.2
10	8.07	Butyric acid	Acid	107-92-6	0.7	1.1	1.0	nf	1.3
11	8.37	2-Furanmethanol	Furan	98-00-0	10.3	23.9	21.6	12.1	16.5
12	8.49	Isovaleric acid	Acid	503-74-2	1.7	3.1	2.7	2.0	2.0
13	9.26	Valeric acid	Acid	109-52-4	2.7	1.0	0.8	nf	1.4
14	9.74	1,2-Cyclopentanedione	Ketone	3008-40-0	1.4	1.3	1.4	1.4	1.8

Table 4 Qualitative chemical components of the extract coffees with GC-MS (cont.)

No.	RT (min)	Compound Name	Groups	CAS#	Area %				
					S1	S2	S3	S4	S5
15	10.51	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Ketone	80-71-7	nf	0.7	0.8	0.8	0.6
16	10.98	Phenol, 2-methoxy-	Phenol	90-05-1	0.7	1.5	1.4	1.6	0.5

Note: The compounds were identified by using of Wiley10&NIST14 libraries, with a match score $\geq 70\%$, nf=Not found

Table 5 Organic acid found in different coffee samples and their concentrations (g/kg)

No.	Compounds	Organic acid concentrations (g/kg)				
		S1	S2	S3	S4	S5
1	Acetic acid	6.54 \pm 0.34	3.08 \pm 0.13	2.76 \pm 0.14	2.63 \pm 0.13	3.88 \pm 0.12
2	Propionic acid	0.53 \pm 0.02	0.31 \pm 0.00	0.30 \pm 0.01	0.31 \pm 0.02	0.34 \pm 0.07
3	Isobutyric acid	0.28 \pm 0.01	0.15 \pm 0.01	0.14 \pm 0.01	nd	nd
4	Butyric acid	0.16 \pm 0.01	0.18 \pm 0.00	0.16 \pm 0.01	nd	0.24 \pm 0.01
5	Isovaleric acid	0.16 \pm 0.01	0.24 \pm 0.01	0.21 \pm 0.00	0.15 \pm 0.01	0.18 \pm 0.01
6	Valeric acid	0.25 \pm 0.01	0.16 \pm 0.01	0.13 \pm 0.01	nd	0.16 \pm 0.02

Note: nd=not detectable, $V_{dis}=25$ mL, $V_{Sample}=5$ mL, $V_{water}=0.12$ L, $L=0.03$ kg

ผลการศึกษาค้นหาเฉพาะปริมาณกรดอินทรีย์สายโซ่สั้น ทั้ง 6 ชนิดในตัวอย่างด้วยเทคนิค GC-FID ซึ่งผลความเข้มข้นที่ได้เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรง นำไปคำนวณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในเมล็ดกาแฟด้วยสมการที่ 1 แสดงความเข้มข้นของกรดอินทรีย์รวม

Table 5) อยู่ในช่วง 3.08-7.92 g/kg โดยความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นรวมในตัวอย่างที่ศึกษาเรียงตามลำดับมากไปน้อย คือ S1 > S5 > S2 > S3 > S4 ซึ่งปริมาณที่ตรวจวัดได้ส่งผลกระทบต่อรสชาติความเปรี้ยวของน้ำกาแฟของแต่ละตัวอย่างจากมากไปน้อยตามลำดับ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นในตัวอย่างกาแฟคั่วกลางสกัดน้ำกาแฟด้วยหม้อต้ม แล้วนำไปเตรียมตัวอย่างด้วยการเจือจางลดผลรบกวนด้วยเมทานอลกับน้ำ หมุนเหวี่ยงแยกอนุภาคขนาดใหญ่ร่วมกับการทำความสะอาดด้วยเครื่อง Auto SPE ด้วยสภาวะที่ดีที่สุด สามารถลดอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีผลกับการทดสอบกับเครื่อง GC ทำให้ขนาดอนุภาคมีขนาดลดลงอย่างชัดเจน ผลของค่าสี ซึ่งแสดงปริมาณสารอินทรีย์กลุ่มอื่น ๆ ที่เป็นสารรบกวนการวิเคราะห์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทำให้การศึกษากำหนดปริมาณกรดอินทรีย์ด้วยเครื่อง GC ทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้สภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC ให้ประสิทธิภาพการแยกกรดอินทรีย์สายโซ่สั้นได้ดี การเตรียมตัวอย่างที่นำเสนอค่าความแม่นยำและความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย

GC-MS แสดงให้เห็นว่าวิธีการเตรียมตัวอย่างที่นำเสนอ แสดงปริมาณกลุ่มกรดอินทรีย์ในสัดส่วนที่สูงสุด ตรงตามจุดประสงค์การวิเคราะห์กรดอินทรีย์สายโซ่สั้นที่ต้องการ ทำให้การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเครื่อง GC-FID มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำในการรายงานผล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณณัฐ ฝดุงกุล สำหรับการทดสอบขนาดอนุภาคและรองศาสตราจารย์อาชีวิน แกสमान ผู้อำนวยการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการฝึกงานของนักศึกษา สหกิจ และสนับสนุนบุคลากรสำนักเครื่องมือ ฯ สร้างผลงานวิจัย ที่มผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- Agilent, T. (2009). Agilent chemStation, *Understanding Your ChemStation*. https://www.agilent.com/cs/library/usermanuals/public/G2070-91126_Understanding.pdf
- Angeloni, G., Masella, P., Spadi, A., Guerrini, L., Corti, F., Bellumori, M., Calamai, L., Innocenti, M., & Parenti, A. (2023). Using ground coffee particle size and distribution to remodel beverage properties. *European Food Research and Technology*, 249(5), 1247-1256. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04210-3>

- AOAC. (2002). AOAC Guidelines for Single Laboratory Validation of Chemical Methods for Dietary Supplements and Botanicals. *AOAC Official Methods of Analysis*, 1-38.
- AOAC. (2016). Guidelines for Standard Method Performance Requirements. *AOAC Official Methods of Analysis*, 1-18. http://www.eoma.aoac.org/app_f.pdf
- Caprioli, G., Navarini, L., Cortese, M., Ricciutelli, M., Torregiani, E., Vittori, S., & Sagratini, G. (2016). Quantification of isoflavones in coffee by using solid phase extraction (SPE) and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS). *Journal of Mass Spectrometry*, 51(9), 698-703. <https://doi.org/10.1002/jms.3802>
- Cerny, C., Schlichtherle-Cerny, H., Gibe, R., & Yuan, Y. (2021). Furfuryl alcohol is a precursor for furfurylthiol in coffee. *Food Chemistry*, 337, 128008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128008>
- Chun, H.-J., Poklis, J. L., Poklis, A., & Wolf, C. E. (2016). Development and Validation of a Method for Alcohol Analysis in Brain Tissue by Headspace Gas Chromatography with Flame Ionization Detector. *Journal of analytical toxicology*, 40(8), 653-658. <https://doi.org/10.1093/jat/bkw075>
- Gianino, C. (2007). Experimental analysis of the Italian coffee pot "moka". *American Journal of Physics-AMER JPHYS*, 75, 43-47. <https://doi.org/10.1119/1.2358157>
- Hassan, H., Othman, M. F., Zakaria, Z. A., Ahmad Saad, F. F., & Abdul Razak, H. R. (2021). Multivariate optimisation and validation of the analytical GC-FID for evaluating organic solvents in radiopharmaceutical. *Journal of King Saud University-Science*, 33(6), 101554. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101554>
- ICH. (2006). ICH Topic Q 2 Validation of Analytical Procedures: Text and Methodolog. *European Medicines Agency*, 1-15.
- Interchim. (2023). *Solvent miscibility table & cut-of*. <http://interchiminc.com/flash-prep-hplc-solvent-properties.html>
- Jham, G. N., Fernandes, S. A., Garcia, C. F., & da Silva, A. A. (2002). Comparison of GC and HPLC for the quantification of organic acids in coffee. *Phytochem Anal*, 13(2), 99-104. <https://doi.org/10.1002/pca.629>
- Jumhawan, U., Putri, S. P., Yusianto, Bamba, T., & Fukusaki, E. (2015). Application of gas chromatography/flame ionization detector-based metabolite fingerprinting for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak). *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120(5), 555-561. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.03.005>
- Kaffe, B. (2023). *How many methods are there to extract drinking coffee?*. <https://bwildkaffe.com>
- Microsoft, C. (2023). *Microsoft excel (version 365)* [Computer software]. <https://www.microsoft.com>
- Moon, J.-K., Yoo, H. S., & Shibamoto, T. (2009). Role of Roasting Conditions in the Level of Chlorogenic Acid Content in Coffee Beans: Correlation with Coffee Acidity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(12), 5365-5369. <https://doi.org/10.1021/jf900012b>
- O'Driscoll, D. J. (2014). Analysis of coffee bean extracts by use of ultra-performance liquid chromatography coupled to quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *MethodsX*, 1, 264-268. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2014.10.006>
- Ramalakshmi, K., & Raghavan, B. (1999). Caffeine in Coffee: Its Removal. Why and How?. *Critical reviews in food science and nutrition*, 39, 441-456. <https://doi.org/10.1080/10408699991279231>
- Raposo, F., Borja, R., Cacho-Rivero, J., Mumme, J., Orupöld, K., Esteves, S., Arias, J., Picard, S., Nielfa Gonzalez, A., Scherer, P., Wierinck, I., Aymerich, E., Cavinato, C., Rodríguez, D. C., Garcia-Mancha Delgado-Urena, N., Lens, P. N. L., & Fernandez-Cegri, V. (2013). First international comparative study of volatile fatty acids in aqueous samples by chromatographic techniques: Evaluating sources of error. *Trends in Analytical Chemistry*, 51, 127-144. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.07.007>
- Ronald E. Majors, W., DE. (2013). *Review sample preparation for chromatograph*. https://www.agilent.com/cs/library/primers/Public/5991-3326EN_SPHB.pdf

- Rosmalina, R., Rani, W., Hamidah, U., & Sintawardani, N. (2020). Determination of volatile fatty acids in tofu wastewater by capillary gas chromatography with flame ionization detection: A Comparison of extraction methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 483, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012038>
- Rune, C. J. B., Giacalone, D., Steen, I., Duelund, L., Münchow, M., & Clausen, M. P. (2023). Acids in brewed coffees: Chemical composition and sensory threshold. *Current Research in Food Science*, 6, 100485. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100485>
- Saud, S., & Salamatullah, A. M. (2021). Relationship between the Chemical Composition and the Biological Functions of Coffee. *Molecules*, 26(24). <https://doi.org/10.3390/molecules26247634>
- Sciences, G. (2023). *How to Select a Sorbent Depending on the Sample Matrix and Target Analyte*. https://www.glsiences.com/product/spe_columns/about_a_spe/01043.html
- Shimadzu, C. (2018). *About Resolution, Part 1*. <https://www.shimadzu.com/an/hplc/support/lib/lctalk/resol-1.html>
- St-Gelais, A. (2014). *GC Analysis-Part V. FID or MS for Essential Oils?*. <https://phytochemia.com/en/2014/09/02/gc-analysis-part-v-fid-or-ms-for-essential-oils/>
- Sun, L., Gong, M., Lv, X., Huang, Z., Gu, Y., Li, J., Du, G., & Liu, L. (2020). Current advance in biological production of short-chain organic acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(21), 9109-9124. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10917-0>
- Utrilla-Catalan, R., Rodríguez-Rivero, R., Narvaez, V., Díaz-Barcos, V., Blanco, M., & Galeano, J. (2022). Growing Inequality in the Coffee Global Value Chain: A Complex Network Assessment. *Sustainability*, 14(2), 672. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/672>
- Walker, V., & Mills, G. A. (2002). Solid-phase extraction in clinical biochemistry. *Annals of Clinical Biochemistry*, 39(Pt 5), 464-477. <https://doi.org/10.1258/000456302320314476>
- Yeager, S., Batali, M., Guinard, J.-X., & Ristenpart, W. (2021). Acids in coffee: A review of sensory measurements and meta-analysis of chemical composition. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63, 1-27. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1957767>
- Yeager, S. E., Batali, M. E., Guinard, J.-X., & Ristenpart, W. D. (2023). Acids in coffee: A review of sensory measurements and meta-analysis of chemical composition. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(8), 1010-1036. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1957767>
- Yeager, S. E., Batali, M. E., Lim, L. X., Liang, J., Han, J., Thompson, A. N., Guinard, J.-X., & Ristenpart, W. D. (2022). Roast level and brew temperature significantly affect the color of brewed coffee. *Journal of Food Science*, 87(4), 1837-1850. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16089>
- Yu, J. M., Chu, M., Park, H., Park, J., & Lee, K. G. (2021). Analysis of Volatile Compounds in Coffee Prepared by Various Brewing and Roasting Methods. *Foods*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061347>

การพัฒนาาระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ

Development of the recommendation system for the selection of major in Information and Communication Technology using decision tree techniques

วงกต ศรีอุไร^{1*}, อนุสรณ์ บรรเทิง² และ คมกฤษณ์ มุธาพร³

Wongkot Sriurai^{1*}, Anusorn Bunteong² and Komkrit Mutaporn³

Received: 8 September 2023 ; Revised: 21 December 2023 ; Accepted: 29 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแบบจำลองแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ อัลกอริทึม Iterative Dichotomiser 3 อัลกอริทึม C4.5 และ Classification and Regression Trees (CART) และ 3) ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบที่พัฒนาขึ้น ข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองประกอบด้วย ข้อมูลผลการเรียน 10 รายวิชา ได้แก่ คอมพิวเตอร์เบื้องต้นและองค์ประกอบคอมพิวเตอร์ การเขียนโปรแกรมเบื้องต้น สถิติและการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โครงสร้างข้อมูลและขั้นตอนวิธี การเขียนโปรแกรมเชิงอ็อบเจกต์ คณิตศาสตร์เต็มหน่วย ระบบฐานข้อมูล การเขียนโปรแกรมบนเว็บ การออกแบบประสบการณ์ผู้ใช้และส่วนติดต่อผู้ใช้งาน และการสื่อสารข้อมูลและเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาปรับสมดุลด้วยวิธี SMOTE แล้วจึงนำมาพัฒนาด้วย อัลกอริทึม Iterative Dichotomiser 3, C4.5 และ Classification and Regression Trees (CART) ระบบนี้ถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันด้วยภาษาพีเอชพีร่วมกับฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธี 10-fold cross validation พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาด้วยอัลกอริทึม C4.5 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 93.20 % ค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.33% และค่าระลึกเท่ากับ 93.32% ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้ระบบจำนวน 30 คนโดยใช้แบบสอบถาม พบว่าค่าเฉลี่ยความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}=3.66$, $SD.=0.93$)

คำสำคัญ: ต้นไม้ตัดสินใจ, อัลกอริทึม Iterative Dichotomiser 3, อัลกอริทึม C4.5, Classification and Regression Trees (CART)

Abstract

The objectives of this research were: 1) to develop a recommendation model for choosing a major in Information and Communication Technology; 2) to compare the performance of decision tree methods such as Iterative Dichotomiser 3, C4.5, and Classification and Regression Trees (CART); and 3) to study the users' satisfaction with the developed system. The data used to develop this model included academic results from 10 subjects: Introduction to Computer and Computer Architecture, Introduction to Programming, Statistics and Quantitative Analysis, Data Structure and Algorithms, Object-Oriented Programming, Discrete Mathematics, Database System, Web Programming, User Experience/User Interface Design, and Data Communication and Internetworking. Data imbalance was addressed using the SMOTE method. After that, the models were constructed using Iterative Dichotomiser 3, C4.5, and CART. The system was developed as a web application using PHP with a MySQL database. The evaluation results given by 10-fold cross-validation, showed that a recommendation model for choosing a major in Information and Communication Technology developed by C4.5 provided the highest level of effectiveness with an accuracy of 93.20%, precision of 93.33%, and recall of 93.32%. The user satisfaction assessment with the proposed system was collected from 30 users through questionnaires. The results indicated that the users' satisfaction was at a high level ($\bar{X}=3.66$, $SD.=0.93$).

Keywords: decision tree, Iterative Dichotomiser 3, C4.5, Classification and Regression Trees (CART)

^{1,2,3} ภาควิชาคณิตศาสตร์ สถิติ และคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

^{1,2,3} Department of Mathematics Statistics and Computer, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

* Corresponding author: Email wongkot.s@ubu.ac.th

บทนำ

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เป็นหลักสูตรที่มุ่งผลิตบัณฑิตที่มีความรู้ ความสามารถ และทักษะในงานทางด้านคอมพิวเตอร์ และการสร้างนวัตกรรมจากข้อมูล โดยหลักสูตรประกอบไปด้วย 3 มิติหลัก ได้แก่ 1) มิติด้านความรู้พื้นฐาน ซึ่งจะประกอบด้วย คณิตศาสตร์ สถิติและคอมพิวเตอร์ 2) มิติด้านความรู้ทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ซึ่งจะเน้นความรู้หลักทั่วไปของงานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร 3) มิติเฉพาะตามวิชาเอกที่สนใจ ซึ่งมี 3 สาขาวิชาเอก ได้แก่ 1) วิชาเอกเทคโนโลยีเกมและการผลิตดิจิทัลคอนเทนต์ เรียนรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีและการพัฒนาเกมแบบ 2 มิติ 3 มิติ การออกแบบและพัฒนาสื่อและคอนเทนต์อย่างสร้างสรรค์ 2) วิชาเอกเทคโนโลยีเครือข่ายและความมั่นคงทางไซเบอร์ เรียนรู้เกี่ยวกับการจัดการการออกแบบระบบเครือข่าย การสร้างความปลอดภัยและความมั่นคงทางไซเบอร์ และ 3) วิชาเอกเทคโนโลยีดิจิทัล เรียนรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนาระบบสารสนเทศบนแพลตฟอร์มต่าง ๆ

ในเบื้องต้นทางหลักสูตรให้นักศึกษาสามารถเลือกสาขาวิชาเอกตามความสนใจและความถนัดของนักศึกษา จากนั้นทางหลักสูตรจะมีคณะกรรมการมาพิจารณาสาขาวิชาเอกหรือแขนงที่นักศึกษาเลือกตามความเหมาะสมอีกครั้ง เนื่องจากที่ผ่านมาจากหลักสูตรประสบปัญหามีนักศึกษบางรายเลือกสาขาวิชาเอกตามที่ตนเองสนใจ แต่ไม่ได้พิจารณาถึงความถนัดหรือความสามารถของตนเอง ทำให้คณะกรรมการจะต้องพิจารณาเลือกวิชาเอกให้นักศึกษาใหม่เพื่อให้นักศึกษาสามารถเรียนและสำเร็จการศึกษาตามเป้าหมายได้ หากนักศึกษาสามารถเลือกสาขาวิชาเอกได้สอดคล้องกับความถนัดและความสามารถนักศึกษา จะส่งเสริมให้นักศึกษาสามารถแสดงศักยภาพได้อย่างเต็มที่ และนำไปสู่การทำงานในอนาคต

ปัจจุบันได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) มาใช้ในการจำแนกและการพยากรณ์ในงานด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ด้านธุรกิจที่ช่วยในการตัดสินใจของผู้บริหาร ด้านการแพทย์ เพื่อจำแนกผู้ป่วยโรคต่าง ๆ และด้านการศึกษา มีการนำเทคนิคเหมืองข้อมูลมาใช้ในการทำนายการพ้นสภาพของนักศึกษา (Viloria *et al.*, 2018) เป็นต้น และเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) ก็เป็นเทคนิคหนึ่งของการทำเหมืองข้อมูลด้านการจำแนกและการพยากรณ์ที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัยหลายๆ ท่าน เช่น งานวิจัยของรัตนาวดี พานทอง (2565) ได้พัฒนาแบบจำลองจำแนกประเภทข้อมูลการท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยวในจังหวัดพะเยาโดยการ ใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ ผลการ

วิจัยพบว่าแบบจำลองมีค่าความถูกต้องในการจำแนกข้อมูลเท่ากับ 81.70% ในขณะที่งานวิจัยของชนพร คล้ายทอง และชุตินันท์ ศรีสวัสดิ์ (2566) ได้พัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์การตกรอกของนักศึกษาด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล โดยเปรียบเทียบ 3 เทคนิค คือ เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) เทคนิค naïve เบย์ (Naïve Bayes) และกฎการอุปนัย (Rule Induction) ผลการวิจัยพบว่าเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 86.29% เป็นต้น

จากปัญหาการเลือกสาขาวิชาเอกและการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคเหมืองข้อมูล ทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยการนำข้อมูลของนักศึกษามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล เพื่อสร้างแบบจำลองที่ช่วยในการตัดสินใจเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยผลของแบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกได้ ช่วยให้นักศึกษามีข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นว่านักศึกษาน่าจะเหมาะกับวิชาเอกไหน และช่วยให้นักศึกษาสามารถเลือกวิชาเอกที่เหมาะสมกับตนเองมากที่สุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองเพื่อแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ อัลกอริทึม Iterative Dichotomiser 3 อัลกอริทึม C4.5 และ Classification and Regression Trees (CART)
3. ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบแนะนำการเลือกสาขาวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

การทำเหมืองข้อมูล

การทำเหมืองข้อมูล คือ กระบวนการค้นหาสารสนเทศหรือองค์ความรู้ที่อยู่ในฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการตัดสินใจ สารสนเทศที่ได้อาจนำมาสร้างการพยากรณ์หรือสร้างตัวแบบสำหรับการจำแนกหรือแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่าง ๆ หรือให้ข้อสรุปของสาระในฐานข้อมูล การทำเหมืองข้อมูลประกอบขึ้นด้วยการนำกระบวนการทางสถิติและการเรียนรู้ผ่านระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างตัวแบบ กฎเกณฑ์ รูปแบบ การพยากรณ์ จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ โดยการทำเหมืองข้อมูลมีขั้นตอนการดำเนินงานหลายขั้นตอนซึ่งต้องอาศัยเทคนิคหรือวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการจัดกลุ่ม การค้นหาความสัมพันธ์ การพยากรณ์ เป็นต้น (Han *et al.*, 2012)

เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ

ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) เป็นการนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ในรูปของต้นไม้ (Tree) ซึ่งต้นไม้ตัดสินใจมีการทำงานแบบมีผู้สอน (Supervised Learning) คือ สามารถสร้างแบบจำลองจากกลุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า หรือที่เรียกว่า ข้อมูลสำหรับการใช้ในการฝึกฝน (Training dataset) และสามารถพยากรณ์กลุ่มของรายการข้อมูลที่ยังไม่เคยนำมาจัดหมวดหมู่ได้ โดยรูปแบบของต้นไม้ตัดสินใจจะประกอบโหนด (Node) แสดงคุณลักษณะ (Attribute) ที่ใช้ทดสอบข้อมูล แต่ละกิ่งแสดงผลในการทดสอบและลีฟโหนด (Leaf Node) แสดงกลุ่มหรือคลาส (Class) ที่กำหนดไว้ ซึ่งต้นไม้ตัดสินใจนี้ง่ายต่อการเข้าใจและปรับเปลี่ยนเป็นกฎการจำแนก (Classification Rules) (Han *et al.*, 2012), (Sharma and Kumar, 2016) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) มีหลากหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจด้วย 3 วิธี ได้แก่

1. Iterative Dichotomiser 3 (ID3 Algorithm) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้สร้างต้นไม้ตัดสินใจที่ใช้หลักการของทฤษฎีสารสนเทศ (Information Theory) โดยจะใช้ค่ามาตรฐานเกน (Gain) ในการวัดว่าจะแบ่งข้อมูลอย่างไร และค่าที่วัดได้จะนำมาใช้ตัดสินใจว่าจะใช้ตัวแปรใดในการแบ่งข้อมูล โดยวิธีการกำหนดโครงสร้างต้นไม้ตัดสินใจจะเป็นการเลือกข้อมูลตามลำดับของตัวชี้วัดหรือค่าเกน (Gain) สูงที่สุดเป็นข้อมูลเริ่มต้น และข้อมูลถัดไปที่มีค่าลดหลั่นกันตามลำดับ จากทฤษฎีสารสนเทศ ซึ่งค่าสารสนเทศของข้อมูลจะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของข้อมูล สามารถเขียนในรูปสมการที่ 1 (Ogheneovo and Nlerum, 2020) ได้ดังนี้

$$Info(D) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

โดยที่

P_i เป็นความน่าจะเป็นที่ข้อมูลในฐานข้อมูล D อยู่ในกลุ่ม C_i ซึ่งมีค่า $|C_{i,D}|/|D|$

m เป็นจำนวนกลุ่มทั้งหมดที่ต่างกันของข้อมูลชุดนั้น C_i เป็นกลุ่มในลำดับที่ i โดยที่ i มีค่าระหว่าง 1 ถึง m $|C_{i,D}|$ เป็นจำนวนข้อมูลในฐานข้อมูล D ที่อยู่ในกลุ่ม C_i $|D|$ เป็นจำนวนข้อมูลในฐานข้อมูล D

ค่า $Info(D)$ ที่ได้นี้สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าค่า Entropy ของฐานข้อมูล D ค่าความรู้จากทฤษฎีสารสนเทศจะ

ช่วยในการแยกแยะข้อมูลทำให้ลดจำนวนครั้งของการทดสอบได้ อีกทั้งยังรับประกันว่าต้นไม้ตัดสินใจที่ได้จะไม่มีความซับซ้อนมากจนเกินไป เมื่อทำการพิจารณาเลือกคุณลักษณะเป็นตัวเลือกทดสอบ จะใช้ค่าความรู้จากทฤษฎีสารสนเทศของคุณลักษณะ สามารถเขียนในรูปสมการที่ 2 (Ogheneovo and Nlerum, 2020) ได้ดังนี้

$$Info_A = \sum_{j=1}^k \frac{|D_j|}{|D|} x Info(D_j) \quad (2)$$

โดยที่

k เป็นจำนวนค่าที่เป็นไปได้ของคุณลักษณะ

$|D|$ เป็นจำนวนข้อมูลในฐานข้อมูล D

$|D_j|$ เป็นจำนวนข้อมูลในฐานข้อมูล D ที่มีค่าที่ j ของคุณลักษณะ A

ค่ามาตรฐานเกนที่จะใช้พิจารณาเลือกคุณลักษณะ A มาเป็นโหนดของต้นไม้มีค่าเท่ากับผลต่างของความรู้จากทฤษฎีสารสนเทศ กับความรู้จากทฤษฎีสารสนเทศของคุณลักษณะ สามารถเขียนสมการที่ 3 (Ogheneovo and Nlerum, 2020) ได้ดังนี้

$$Gain(A) = Info(D) - Info_A(D) \quad (3)$$

2. อัลกอริทึม C4.5 เป็นอัลกอริทึมที่ใช้สร้างต้นไม้ตัดสินใจที่พัฒนาโดย John, R. Q. (1993) โดยมีพื้นฐานเดียวกับอัลกอริทึม ID3 โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้สร้างต้นไม้ตัดสินใจสำหรับแบ่งกลุ่มข้อมูลจะใช้หลักการของ Information gain เช่นเดียวกับ ID3 แต่จะมีส่วนเพิ่มเติมจาก ID3 เข้ามา โดยอัลกอริทึม C4.5 ได้เพิ่มการใช้ค่ามาตรฐานอัตราส่วนเกน (Gain Ratio criterion) ในการตัดสินใจเลือกคุณลักษณะที่จะใช้เป็นโหนดรากหรือโหนดระดับต่าง ๆ บนต้นไม้ ซึ่งอัลกอริทึม C4.5 เข้ามาแก้ไขจุดด้อยของอัลกอริทึม ID3 (Han *et al.*, 2012), (Sharma and Kumar, 2016) ได้ดังนี้

(1) สามารถใช้งานได้ทั้งข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous data) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete data)

(2) สามารถใช้กับชุดข้อมูลทดสอบ ที่มีค่าข้อมูลขาดหายได้ (Missing data) โดยจะแทนค่าด้วย “?” และไม่นำค่านั้นมาคำนวณในกฎของความรู้จากทฤษฎีสารสนเทศ

(3) สามารถใช้กับชุดข้อมูลทดสอบที่มีค่าผิดปกติ หรือมีความเสียหายได้

(4) สามารถทำการตัดกิ่งต้นไม้ตัดสินใจในขณะสร้างได้ โดยไม่ทำให้ความถูกต้องลดลง

การเลือกคุณลักษณะที่ใช้เป็นโหนดรากหรือโหนดบนต้นไม้ตัดสินใจนั้นอัลกอริทึม ID3 จะใช้ค่าเกน (Gain) เป็นหลักในการเลือก แต่อัลกอริทึม C4.5 นั้นได้เพิ่มการใช้ค่ามาตรฐานอัตราส่วนเกน (Gain ratio criterion) ในการตัดสินใจเลือกคุณลักษณะ เนื่องจากค่าเกนจะมีการเอนเอียง (Bias) อย่างมากกับข้อมูลที่ประกอบด้วยคุณลักษณะที่มีค่าที่เป็นไปได้จำนวนมากๆ การแก้ไขความเอนเอียงของค่าเกนสามารถทำได้โดยการปรับค่ามาตรฐานเกนให้ถูกต้องโดยใช้ค่าสารสนเทศของการแบ่งแยก (Split information) ของคุณลักษณะแต่ละตัวสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$SplitInfo(A) = - \sum_{j=1}^k \frac{|D_j|}{|D|} \times \log_2 \left(\frac{|D_j|}{|D|} \right) \quad (4)$$

ค่าสารสนเทศของการแบ่งแยก (Split information) นี้จะแสดงถึงระดับการกระจายของข้อมูล เมื่อนำค่านี้ไปหารค่าเกนจะได้ค่ามาตรฐานอัตราส่วนเกน สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$GainRatio(D) = \frac{Gain(A)}{SplitInfo(A)} \quad (5)$$

ค่ามาตรฐานอัตราส่วนเกนช่วยแก้ไขความเอนเอียงของค่าเกนได้ โดยทำให้ค่ามาตรฐานอัตราส่วนเกนในแบ่งด้วยคุณลักษณะที่มีการกระจายสูงถูกปรับลดลง

3. Classification and Regression Trees (CART) ต้นไม้ตัดสินใจที่สร้างจากอัลกอริทึม CART นี้ เป็นการสร้างต้นไม้แบบ Binary ซึ่งประกอบด้วย กิ่งหรือแขนง 2 กิ่ง สำหรับแต่ละโหนด โดยอัลกอริทึม CART จะใช้ค่าดัชนีจีนิ (Gini index) ในการวัดว่าจะแบ่งข้อมูลอย่างไร โดยค่า Gini index เป็นการประเมินค่าที่บ่งบอกว่าลักษณะใดเหมาะสมที่จะเป็นลักษณะสำคัญโดยวัดค่าจากแต่ละลักษณะ แล้วทำการเปรียบเทียบกับลักษณะอื่น ๆ เพื่อหาหลักที่มีค่า Gini index ที่น้อยที่สุดเป็นหลักสำคัญ ซึ่งวิธีการคำนวณ (Han et al., 2012), (Sharma and Kumar, 2016) ดังนี้

$$Gini(t) = 1 - \sum_j [p(j|t)]^2 \quad (6)$$

โดยที่

$p(j|t)$ คือ ค่าความถี่สัมพัทธ์ของคลาส j ในโหนด t

จากสมการที่ 6 เป็นการคำนวณค่า Gini index ของแต่ละโหนด ซึ่งในการสร้างต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ค่า Gini index นั้นจำเป็นต้องคำนวณค่า Gini index ของผลรวมของโหนดนั้นด้วย โดยเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted average) ของแต่ละโหนด ดังสมการที่ 7

$$Gini_{split} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n} Gini(i) \quad (7)$$

โดยที่

n_i = จำนวนของเรคคอร์ด (Record) ที่โหนด child i

n = จำนวนของเรคคอร์ด (Record) ที่โหนด P

เทคนิคการสุ่มเพิ่มตัวอย่างกลุ่มน้อย

Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) เป็นเทคนิคที่เข้ามาช่วยแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูลที่ไม่สมดุล จากข้อมูลในแต่ละคลาสนั้นมีจำนวนที่แตกต่างกันมาก ทำให้ผลลัพธ์ในการจำแนกจะตกไปอยู่ข้อมูลที่ที่มีกลุ่มมาก ดังนั้นการใช้เทคนิค SMOTE จึงเป็นอีกวิธีเพื่อเพิ่มจำนวนของข้อมูลคลาสน้อย ให้มีจำนวนคลาสมากขึ้น อาศัยหลักการกระจายข้อมูล ข้อมูลที่ได้เกิดความสมดุลมากขึ้น หลักการสุ่มค่าข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มข้อมูลคลาสน้อยขึ้นมา 1 ค่า แล้วพิจารณาค่าข้อมูลที่อยู่ใกล้เคียง จำนวน K ค่า จากนั้นคำนวณค่าระยะทาง ของระหว่างค่าที่สุ่มและค่าข้อมูลที่อยู่ใกล้เคียงกัน เพื่อได้ค่าระยะทางน้อยที่สุด (Chawla et al., 2002)

การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าในตาราง Confusion Matrix โดยในตารางนี้จะเก็บข้อมูลจำนวนแถวที่จำแนกจากกลุ่มข้อมูลจริงและกลุ่มข้อมูลจากการทำนาย ซึ่งตารางนี้จะมีขนาด $m \times m$ โดยที่ m คือจำนวนของกลุ่ม ดัง Figure 1

		Predicted Class	
		Class=Yes	Class=No
Actual Class	Class=Yes	TP	FN
	Class=No	FP	TN

Figure 1 Confusion Matrix

อธิบายค่าต่าง ๆ ของ Confusion Matrix ได้ดังนี้

True positive (TP) หมายถึง ค่าคลาสเป้าหมาย คือ Yes และโมเดลทำนายว่า Yes

False negative (FN) หมายถึง ค่าคลาสเป้าหมาย คือ Yes และโมเดลทำนายว่า No

True negative (TN) หมายถึง ค่าคลาสเป้าหมาย คือ No และโมเดลทำนายว่า No

False positive (FP) หมายถึง ค่าคลาสเป้าหมาย คือ No และโมเดลทำนายว่า Yes

การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองสามารถคำนวณตามสมการ (Powers, 2011), (Han *et al.*, 2012) ดังนี้

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \tag{6}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \times 100 \tag{7}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \tag{8}$$

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองเพื่อแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ อัลกอริทึม ID3 C4.5 และ CART โดยมีขั้นตอนดำเนินการ 4 ขั้นตอนดังนี้ 1) รวบรวมข้อมูล 2) เตรียมข้อมูล 3) พัฒนาแบบจำลองด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ ID3 C4.5 และ CART 4) วัดประสิทธิภาพแบบจำลอง และ 5) พัฒนาด้านแบบระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ซึ่งภาพการทำงานโดยรวมดัง Figure 2

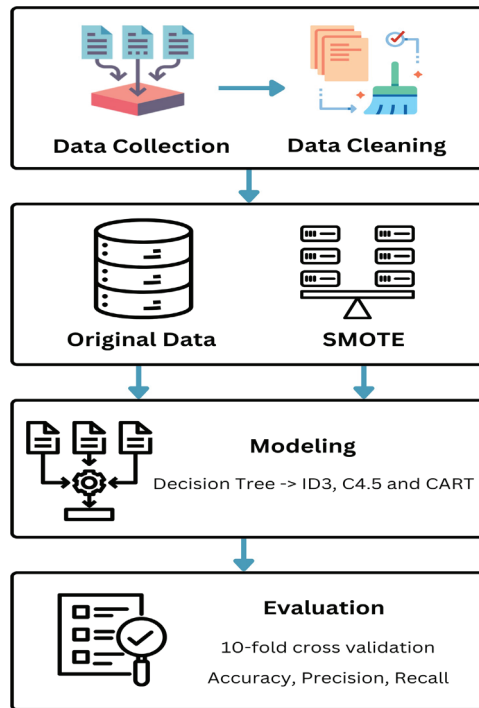


Figure 2 Research Process

1. รวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลผลการเรียนจำนวน 10 รายวิชาของนักศึกษาในสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร เป็นข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2563-2565 โดยชุดข้อมูลประกอบด้วยคุณลักษณะ (Attribute) ได้แก่ 1) ผลการเรียนคอมพิวเตอร์เบื้องต้นและองค์ประกอบคอมพิวเตอร์ 2) ผลการเรียนการเขียนโปรแกรมเบื้องต้น 3) ผลการเรียนสถิติและการวิเคราะห์เชิงปริมาณ 4) ผลการเรียนโครงสร้างข้อมูลและขั้นตอนวิธี 5) ผลการเรียนการเขียนโปรแกรมเชิงอ็อบเจกต์ 6) ผลการเรียนคณิตศาสตร์เต็มหน่วย 7) ผลการเรียนระบบฐานข้อมูล 8) ผลการเรียนการเขียนโปรแกรมบนเว็บ 9) ผลการเรียนการออกแบบประสบการณ์ผู้ใช้และส่วนติดต่อผู้ใช้งาน และ 10) ผลการเรียนการสื่อสารข้อมูลและเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

2. เตรียมข้อมูล

หลังจากที่รวบรวมข้อมูลในหัวข้อ 1. เรียบร้อยแล้ว ข้อมูลที่รวบรวมมาได้มีข้อมูลบางส่วนที่ต้องจัดการก่อนที่จะนำไปพัฒนาแบบจำลองดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงนำข้อมูลชุดนี้มาผ่านกระบวนการ Data Cleaning และ Data Transformation หลังจากกระบวนการดังกล่าวจะได้คุณลักษณะ (Attribute) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีรายละเอียด ดัง Table 1

Table 1 Features used for developing model

No.	Courses	Assessment
1	Introduction to Computer and Computer Architecture	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
2	Introduction to Programming	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
3	Statistics and Quantitative Analysis	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
4	Data Structure and Algorithms	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
5	Object-Oriented Programming	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
6	Discrete Mathematics	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
7	Database System	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
8	Web Programming	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
9	User Experience/User Interface Design	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
10	Data Communication and Inter-networking	A, B+, B, C+,C, D+, D, F
11	Class	- Game Technology and Digital Content Creation (A1) - Network Technology and Cyber Security (B2) - Digital Technology (C3)

เมื่อรวบรวมข้อมูลจาก Table 1 เรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล จากนั้นแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล .CSV เพื่อนำเข้าไปสู่โปรแกรม Weka ดัง Figure 3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	computer	program	statistic	structure	objects	maths	system	web	desigh	network	Class
2	D	C	C+	D+	C+	C	D+	C	B	C	B2
3	A	A	B+	A	A	A	A	A	A	A	B2
4	C	D+	C	B+	A	C	C	C+	C+	C+	A1
5	C	B	B	C	A	D+	D+	D+	B	C	C3
6	B	A	A	A	A	C+	B+	A	A	A	B2
7	A	A	A	A	A	A	B+	B	C+	A	B2
8	C+	A	C+	B+	A	C	C	C	B	D+	A1
9	A	B	C+	B	A	C	B	C	B	B	C3
10	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B2
11	B+	C+	B	C+	C+	B	B	A	A	B	B2
12	D+	A	D	D	B	D	C	C	B	D+	B2
13	D+	C	C+	C	B+	D+	C	C	B	C	C3
14	C+	A	B+	A	A	B+	C+	A	B	A	B2
15	C+	A	B+	C+	A	B	C+	D+	B	C	C3
16	D	D	D+	C+	C	D+	D+	D+	B	D+	A1
17	A	A	C+	C+	A	C	C	B	B+	C	A1
18	D+	C+	B	C	B+	B+	C	C	C	C	B2
19	A	A	C+	C+	B+	D+	D	D+	C+	C	B2
20	C	D	C+	C+	C	B+	C+	B+	B+	C	C3

Figure 3 The examples of data used for developing the model

3. พัฒนาแบบจำลองด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจโดยใช้ อัลกอริทึม ID3 C4.5 และ CART

หลังจากแปลงข้อมูล (Data Transformation) เรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบความถูกต้องและวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว พบว่ามีข้อมูลบางกลุ่มที่มีจำนวนน้อย ทำให้ข้อมูลที่รวบรวมมาได้ขาดความสมดุล ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมมาได้เป็น

ข้อมูลผลการเรียนของนักศึกษาจำนวน 196 คน แบ่งเป็นข้อมูลในกลุ่ม A1=70 B2=48 และ C3=78 เรคคอร์ด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงปรับให้ข้อมูลมีความสมดุลด้วยวิธี Synthetic Minority Over-sampling TEchnique (SMOTE) ซึ่งวิธี SMOTE ใช้แก้ปัญหาการมีชุดข้อมูลที่ผลลัพธ์ของคำตอบที่จะพยากรณ์มีสัดส่วนไม่เท่ากัน (Chawla *et al.*, 2002) โดยปรับค่าพารามิเตอร์ ในการเพิ่มจำนวนข้อมูลทุกกลุ่มตั้งแต่อยุ่ละ 100 ถึง 300 ผลการเพิ่มจำนวนข้อมูล 100% จะได้ A1=142 B2=86 และ C3=108 เรคคอร์ด ผลการเพิ่มจำนวนข้อมูล 200% จะได้ A1=224 B2=122 และ C3=168 เรคคอร์ด ผลการเพิ่มจำนวนข้อมูล 300% จะได้ A1=324 B2=221 และ C3=274 เรคคอร์ดหลังจากปรับความไม่สมดุลของข้อมูลด้วยวิธี SMOTE แล้วนำข้อมูลชุดนี้ไปสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ 3 วิธี ได้แก่ ID3 C4.5 และ CART

4. วัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธี 10-fold cross validation เพื่อให้ข้อมูลทุกตัวมีโอกาสเป็นชุดทดสอบและชุดสอน โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ชุดเท่ากัน ใช้ 1 ชุดเป็นกลุ่มทดสอบ ข้อมูลอีก 9 ชุดเป็นกลุ่มที่ใช้ในการเรียนรู้และทำการวนซ้ำจำนวน 10 รอบ โดยเปลี่ยนกลุ่มทดสอบไปเรื่อย ๆ จนครบ ในส่วนการวัดประสิทธิภาพค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพแบบจำลองคือ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าระลึก (Recall) (Powers, 2011; Han *et al.*, 2012)

5. พัฒนาระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

หลังจากที่พัฒนาแบบจำลองแล้ว คณะผู้วิจัยเลือกแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด นำไปใช้ในการพัฒนาระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

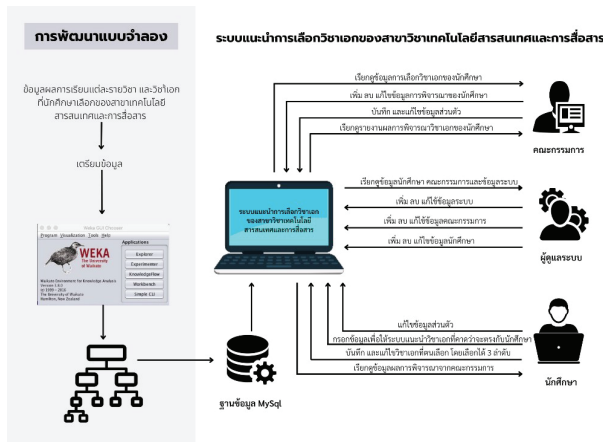


Figure 4 The structure of the recommendation system for the selection of a major in Information and Communication Technology

และการสื่อสาร โดยระบบพัฒนาด้วยภาษาพีเอชพี (PHP) ร่วมกับฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล (MySQL) โดยโครงสร้างระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ดัง Figure 4

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาแบบจำลองเพื่อแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ

ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยโปรแกรม Weka การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองใช้วิธีทดสอบประสิทธิภาพด้วยวิธี 10-fold cross validation ซึ่งข้อมูลให้นำมาสร้างแบบจำลองจะต้องผ่านกระบวนการปรับความไม่สมดุลของข้อมูลด้วยวิธี SMOTE ก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่เข้าสู่กระบวนการจำแนกข้อมูลด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ 3 วิธี ได้แก่ ID3 C4.5 และ CART ซึ่งมีการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธี 10-fold cross validation เพื่อเปรียบเทียบค่า Precision Recall และ Accuracy สามารถสรุปผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ดัง Table 2

Table 2 The results of the model's effectiveness evaluation

Method	Precision (%)	Recall (%)	Accuracy (%)
ID3(Original data)	86.21	86.23	86.20
C4.5 (Original data)	87.44	87.43	87.41
CART(Original data)	86.13	86.16	86.15
SMOTE (100%) & ID3	88.24	88.23	88.21
SMOTE (200%) & ID3	89.54	89.55	89.52
SMOTE (300%) & ID3	90.45	90.44	90.42
SMOTE (100%) & C4.5	91.42	91.41	91.40
SMOTE (200%) & C4.5	93.33	93.32	93.20
SMOTE (300%) & C4.5	92.14	92.13	92.10
SMOTE (100%) & CART	87.32	87.30	87.31
SMOTE (200%) & CART	88.63	88.64	88.61
SMOTE (300%) & CART	89.41	89.43	89.42

จาก Table 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยข้อมูลมีการปรับความไม่สมดุลของข้อมูลด้วยวิธี SMOTE โดยเพิ่มจำนวนข้อมูลตั้งแต่ร้อยละ 100 ถึง 300 ผลการทดลองพบว่าขนาดชุดข้อมูลที่สามารเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ดีที่สุด คือร้อยละ 200 แบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ SMOTE (200%) & C4.5 มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ 93.20% ค่า

ความแม่นยำ (Precision) เท่ากับ 93.33% และค่าระลึก (Recall) เท่ากับ 93.32% แบบจำลองนี้ให้ผลลัพธ์ คือกฎที่ใช้ในการตัดสินใจจำนวน 21 กฎ โดยกฎที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบแนะนำวิชาเอกของสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารได้ ขอยกตัวอย่างกฎที่ได้จากแบบจำลองจำนวน 2 กฎ ดังนี้

IF network=B AND web=C THEN=C3

ถ้า ผลการเรียนรู้การสื่อสารข้อมูลและเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเกรด B และผลการเรียนการเขียนโปรแกรมบนเว็บเกรด C แล้วนักศึกษาจะเลือกวิชาเอกเทคโนโลยีดิจิทัล

IF network=B AND web=A THEN=A1

ถ้า ผลการเรียนรู้การสื่อสารข้อมูลและเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเกรด B และผลการเรียนการเขียนโปรแกรมบนเว็บ เกรด A แล้วนักศึกษาจะเลือกวิชาเอกเทคโนโลยีเกมและการผลิตดิจิทัลคอนเทนท์

2. ผลการพัฒนาต้นแบบระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

ต้นแบบระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ภาพด้านล่างเป็นภาพหน้าหลักของระบบ ดัง Figure 5

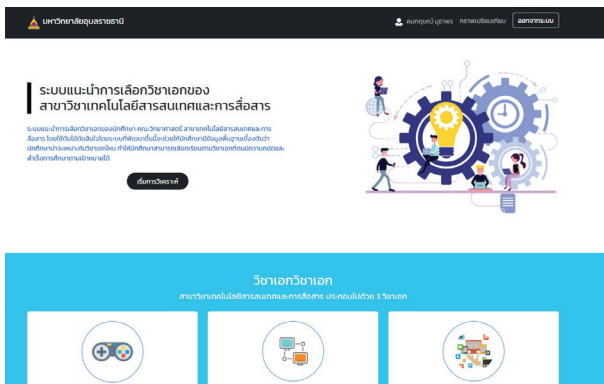


Figure 5 Screen design for main homepage

ผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลผลการเรียนเพื่อให้ระบบแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ดัง Figure 6

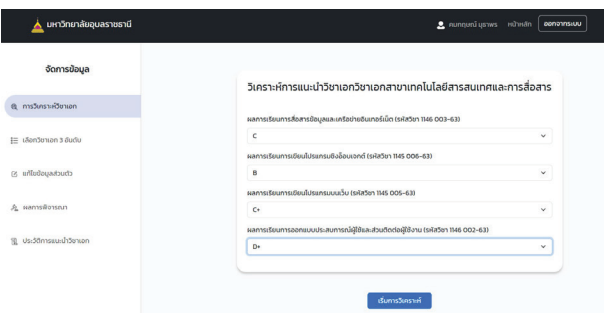


Figure 6 Screen design for fill in the grades

หลังจากที่กรอกข้อมูลด้านบนเรียบร้อยแล้วระบบจะแนะนำวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ดัง Figure 7

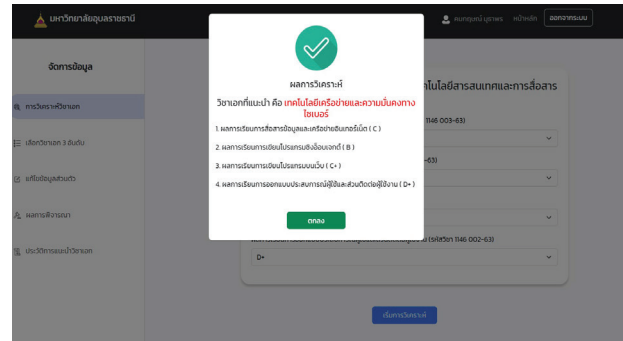


Figure 7 Screen design for recommendation of a major in Information and Communication Technology

3. ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ

คณะผู้วิจัยได้ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบแนะนำวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยใช้แบบสอบถามความพึงพอใจจากผู้ใช้ที่เป็นนักศึกษาจำนวน 30 คน ในแบบสอบถามใช้มาตราส่วนประมาณค่า (rating scale) 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด ใช้เกณฑ์การแปล ความหมายของ (บุญชม ศรีสะอาด, 2560) ดังนี้ ผลปรากฏดัง Table 3

- 4.51-5.00 หมายถึง เห็นด้วยมากที่สุด
- 3.51-4.50 หมายถึง เห็นด้วยมาก
- 2.51-3.50 หมายถึง เห็นด้วยปานกลาง
- 1.51-2.50 หมายถึง เห็นด้วยน้อย
- 1.00-1.50 หมายถึง เห็นด้วยน้อยที่สุด

Table 3 The average score of user satisfaction towards the recommendation system

Assessment item	\bar{X}	S.D.	level
1. The ability to recommend a major in Information and Communication Technology using decision tree techniques	3.77	0.94	Good
2. The ability to display results for considering a major from the committee	3.65	0.96	Good
3. The system's ability to display the history of the recommendation for choosing a major in Information and Communication Technology	3.73	0.89	Good
4. The system's ability to display graphs comparing the number of users in each major in Information and Communication Technology	3.57	0.96	Good
5. Show the results of the recommendation for choosing a major in Information and Communication Technology correctly	3.70	0.96	Good
6. The accuracy of data recording on the web application	3.63	0.84	Good
7. The accuracy for updating data on the web application	3.53	0.94	Good
8. Ease of use of the web application	3.73	0.96	Good
9. The appropriateness of the screen design	3.57	0.89	Good
10. The appropriateness of user interaction	3.67	0.97	Good
11. The appropriateness of web application security	3.65	0.89	Good
12. Overall satisfaction with web application usage	3.72	0.96	Good
Overall assessment results	3.66	0.93	Good

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้เว็บแอปพลิเคชันแนะนำวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร จำนวน 30 คน ประกอบด้วยรายการประเมิน 12 ข้อ พบว่าโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X}=3.66$, S.D.=0.93) ข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรก คือ ความสามารถในการแนะนำวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก ($\bar{X}=3.77$, S.D.=0.94) รองลงมา คือ ความสามารถของระบบในการแสดงผลประวัติการวิเคราะห์วิชาเอก อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก ($\bar{X}=3.73$, S.D.=0.89) และความง่ายต่อการใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก ($\bar{X}=3.73$, S.D.=0.96) ดังแสดงใน Table 3

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองเพื่อแนะนำการเลือกวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ 3 วิธี คือ อัลกอริทึม ID3 C4.5 และ CART และศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบแนะนำการเลือกสาขาวิชาเอกของสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองเป็นข้อมูลผลการเรียนของนักศึกษาซึ่งประกอบด้วย ผลการเรียน 10 รายวิชา เนื่องจากข้อมูลที่รวบรวมมาได้มีข้อมูลบางกลุ่มที่มีจำนวนน้อย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงปรับความไม่สมดุลของข้อมูลด้วยวิธี SMOTE โดยปรับค่าพารามิเตอร์ ในการเพิ่มจำนวน

ข้อมูลตั้งแต่ร้อยละ 100 ถึง 300 หลังจากปรับความไม่สมดุลของข้อมูลด้วยวิธี SMOTE แล้วนำข้อมูลชุดนี้ไปสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ 3 วิธี คือ ID3 C4.5 และ CART ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยวิธี 10-fold cross validation ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาด้วยอัลกอริทึม C4.5 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 93.20 % ค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.33% และค่าระลอกเท่ากับ 93.32% สำหรับผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานระบบ จำนวน 30 คน พบว่าในภาพรวมผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.66 และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.93 ซึ่งสรุปได้ว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจอยู่ในระดับ มาก ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธนพร คล้ายทอง และ ชุตติพันธ์ ศรีสวัสดิ์ (2566) ที่แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วิธีเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) นำสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์ข้อมูลให้ประสิทธิภาพในระดับดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต ควรนำคุณลักษณะอื่นมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น ข้อมูลความสนใจ หรือความสามารถพิเศษของนักศึกษามาวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง และควรพัฒนาในรูปแบบของ Mobile Application ที่สามารถใช้งานได้ง่าย

เอกสารอ้างอิง

- ชนพร คล้ายทอง และ ชุตติพันธ์ ศรีสวัสดิ์. (2566). การพยากรณ์การตกออกของนักศึกษา ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล, *วารสารวิทยาการสารสนเทศและเทคโนโลยีประยุกต์*, 5(1), 1-17.
- บุญชม ศรีสะอาด. (2560). *การวิจัยเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.
- รัตนาวดี พานทอง. (2565). การจำแนกประเภทข้อมูลการท่องเที่ยวในจังหวัดพะเยาโดยใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ. *วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่ (JSID)*, 3(3), 40-53.
- Chawla, N., Bowyer, K., Hall, L., Kegelmeyer, W. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling TEchnique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 341-378.
- Han, J., Kamber, M., Pei J., (2012). *Data Mining: Concepts Techniques*, 3rd ed. San Mateo, CA, USA: Morgan Kaufmann.
- Ogheneovo, E.E., Nlerum, P.A., (2020). Iterative Dichotomizer 3 (ID3) Decision Tree: A Machine Learning Algorithm for Data Classification and Predictive Analysis, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 7(4), 514-521.
- Powers, D.M.W., (2011). Evaluation : From Precision, Recall and F-measure To ROC, Informedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2(1), 37-63.
- Sharma, H., Kumar, S., (2016). A Survey on Decision Tree Algorithms of Classification in Data Mining. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 5(4), 2094-2097.
- Viloria, A. J., Padilla, C. G., Vargas-Mercado, H. Hernández-Palma, N. O. Llinas, David, M. A., (2019). Integration of Data Technology for Analyzing University Dropout. *Procedia Comput. Sci.*, 155(2018), 569-574.

การวิเคราะห์ตระกร้าตลาดโดยใช้กฎความสัมพันธ์และแอปพลิเคชันการใช้งาน

Market basket analysis using association rules and its applications

ศิริลักษณ์ แก้วศิริรุ่ง¹, ขนิษฐา หอมจันทร์², วรวิทย์ ฝั้นคำอ้าย³, กัญญณ์พัชฌ์ พลเยี่ยม⁴,
จักรี ม่วงสาร⁵, วรารุช วิสมกา⁶ และ นงนุช เกตุย^{7*}
Sirilux Kaewsirirung¹, Kanitha Homjun², Worawit Fankam-ai³, Kannapat Polyiam⁴,
Jakkrit Muangsan⁵, Warawut Wisomka⁶ and Nongnuch Ketui^{7*}

Received: 18 December 2023 ; Revised: 15 January 2024 ; Accepted: 1 February 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันบ่อยครั้งนักท่องเที่ยวในประเทศไทยต้องการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ท้องถิ่น เรียกว่า หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) หลังจากท่องเที่ยว ซึ่งปัญหาหนึ่งของนักท่องเที่ยวที่มีความยากตัดสินใจว่าผลิตภัณฑ์ใดที่ขายดี หรือโปรโมชันใดที่เป็นทางเลือกในกลุ่มผลิตภัณฑ์มากมาย จากสาเหตุดังกล่าวจำเป็นต้องใช้การเรียนรู้กฎความสัมพันธ์ เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของข้อมูลและรูปแบบรายการขายของผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่มียอดความถี่ของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ซื้อพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ด้วยความถี่ของการซื้อขายผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเอพฟิโกรท และอัลกอริทึมอะพริออริสำหรับการแนะนำผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ สำหรับการทดลองได้ใช้ชุดข้อมูลจำนวน 2 ชุด จากร้านบ้านถั่วลิสงและศูนย์จำหน่ายสินค้าโอท็อป ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2565 ที่มีจำนวน 200,000 รายการ การศึกษามุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเอพฟิโกรท และอัลกอริทึมอะพริออริ พบว่าเวลาการประมวลผลของอัลกอริทึมอะพริออริดีกว่าเทคนิคเอพฟิโกรท ในขณะที่ภาพรวมการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานของแอปพลิเคชันแนะนำผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับดีมาก หรือเท่ากับ 4.72

คำสำคัญ: กฎความสัมพันธ์, อัลกอริทึมอะพริออริ, เอพฟิโกรท, วิเคราะห์ตระกร้าตลาด, ระบบแนะนำ

Abstract

Currently, many tourists in Thailand often discover a local product called One Tambon One Product (OTOP) during their travels. The problem is that tourists have difficulty determining which products are best-selling and suitable for use as their preferred item packages from the hundreds of available options. This is why association rule learning is needed to explore the correlation information and sales transaction patterns for OTOP items that are most frequently sold as product pairs. Our research aims to analyze the frequency of the most popular item sets from sales data in OTOP and to compare the performance of the Frequent Pattern Growth (FP-Growth) algorithm and the Apriori algorithm for OTOP recommendations. We used two datasets from Peanut House and the Nan OTOP Center, covering the years

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: siriluxk@rmutl.ac.th

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: kanithahomjun@rmutl.ac.th

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: worawit@rmutl.ac.th

⁴ คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: duangsamorn.d@rmutl.ac.th

⁵ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: jakkri_mu63@live.rmutl.ac.th

⁶ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: i-y@hotmail.com

⁷ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน Email: nongnuchketui@rmutl.ac.th

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: siriluxk@rmutl.ac.th

² Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: kanithahomjun@rmutl.ac.th

³ Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: worawit@rmutl.ac.th

⁴ Faculty of Business and Liberal Art, RMUTL Nan Email: duangsamorn.d@rmutl.ac.th

⁵ Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: jakkri_mu63@live.rmutl.ac.th

⁶ Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: i-y@hotmail.com

⁷ Faculty of Science and Agricultural Technology, RMUTL Nan Email: nongnuchketui@rmutl.ac.th

* Corresponding Author Email: nongnuchketui@rmutl.ac.th

2016 to 2022, with a total of 200,000 records for the experiment. This study aims to compare the performance of the Apriori and FP-Growth algorithms. The execution time of the Apriori algorithm outperformed that of the FP-Growth method. Overall, user satisfaction with the recommended system is rated very high, at 4.72.

Keywords: Association Rule, Apriori Algorithm, FP-Growth, Market Basket Analysis, Recommended System

Introduction

Nan Province is located in the north of Thailand and is considered a non-principal town according to government policy. Many tourists like to visit and discover local products as souvenirs. These local products are known as One Tambon One Product (OTOP). The problem is that tourists have difficulty determining which Nan OTOPI items are best-selling and suitable for use as their preferred item packages.

Market basket analysis is a data mining technique employed by merchants to enhance sales by gaining deeper insights into consumer purchasing behaviors. Data mining typically employs four techniques to generate descriptive and predictive capabilities: regression, association rule discovery, classification, and clustering. One popular application of data mining in recommender systems is finding association rules. Association rules have been successfully applied in various contexts, such as optimizing shelf arrangements in retail stores and determining promotional strategies.

Association rule learning can be applied to OTOPI's market basket analysis to identify best-selling items and determine effective product promotion sets. A minimal degree of support and confidence is required as part of the association criteria. The initial stage in producing association rules involves applying a minimally supported frequent itemset to a given set of frequent items. Next, we can infer selection criteria for items from collections by setting a minimal level of certainty. Each item in the association rules is then linked together using the lift value. The rules take the form of "if A, then B," where "A" and "B" can represent specific items, values, words, etc. The association rule consists of two item sets:

1. Left-Hand Side (L) or antecedent
2. Right-Hand Side (R) or consequent

The reliability of a relationship can be evaluated based on support, confidence, and lift. Under the minimal

support and minimum confidence assumptions, all association rules are examined during association rule learning. The process of mining association rules involves two stages: (Patil, M., & Patil, T., 2022) identifying the most commonly used groups of items as the join step and evaluating all the rules with threshold values to prune those that do not meet the minimum support and confidence criteria.

Market basket analysis uncovers customers' purchasing patterns by identifying significant associations among the products included in their shopping baskets (Hossain, M., Sattar, A.S., & Paul, M. K., 2019). The findings indicate that when analyzing the most popular items, it is feasible to achieve nearly identical frequent item sets and association rules in a shorter time compared to computing all items. Moreover, a comparison of the time taken between the FP-Growth and Apriori algorithms reveals that the former is more time-efficient.

Online shopping is gaining immense popularity in the modern virtual market, with customers making purchasing decisions based on their basic and relative needs. Shopkeepers play a significant role in influencing customers in the physical market. A recommendation engine serves as an automated shopkeeper, providing valuable suggestions. In this research (Tareq, S.U., Noor, M. H., & Bepery, C., 2020), the FP-Growth method was utilized due to its efficiency compared to the Apriori algorithm, which requires substantial time and memory resources to operate optimally.

Incorporating data mining techniques, companies can analyze transaction data to uncover consumer buying patterns. In this research (Aldino, A.A., Pratiwi, E.D., et al., 2021), the authors employed association rule mining, commonly known as market basket analysis, for processing transaction data using RapidMiner. The study compares the performance of the FP-Growth and Apriori algorithms in this context. Based on the comparison results, it can be inferred that the FP-Growth algorithm outperforms the Apriori algorithm.

A study (Fadillah, A. R., Yulita, *et al.*, 2021) used the FP-Growth association algorithm to evaluate transaction data and identify the best parameters for cross-selling and upselling coffee. The association guidelines can assist organizations in implementing effective cross-selling and upselling techniques.

Knowledge discovery in databases (KDD) and data mining (DM) are processes for extracting useful information from large datasets using tools such as statistical analysis, machine learning, and database management systems (Goebel, V., 2014). The following are the three steps involved in data mining:

1. Preprocessing involves obtaining the right data and organizing it in a useful way. The raw dataset needs to have noise removed, and the remaining relational dataset will be used to build the actual model.

2. Modeling means creating a representation using the selected data. The appropriate approach is chosen after exploring the problem, and the model is then tested with new data.

3. Postprocessing entails putting the model into operation in the real world via an application programming interface.

Purba *et al.* (Fatoni, C. S., Utami, E., & Wibowo, F. W., 2018) proposed an Android app for shoe recommendations using the Apriori algorithm. The system collects user-shoe interaction data to generate association rules, which are used to recommend shoes to users based on their past interactions. The system is user-friendly and provides relevant recommendations.

PK Singh, M. Sinha, S. Das, and P. Choudhury (Singh, P.K., Sinha, M., *et al.*, 2020) propose a method to improve the accuracy of item-based collaborative filtering by using the Bhattacharyya coefficient to measure similarity between items. The authors also consider the categorical attributes of items when calculating similarity.

Both the Apriori and FP-Growth algorithms are well-known techniques for finding such recurrent patterns. This paper studies the performance evaluation of these two techniques based on the Nan OTOP Center dataset. We compare the execution times of the two algorithms and identify the factors influencing performance. The association rules generated by the algorithms are used

to analyze Nan OTOP's market basket, and they can also inform OTOP promotions.

Data Mining

Association Rule Learning

Association rule learning is a machine learning technique that uses rules to find novel correlations in large datasets (Liu, B., Hsu, W., & Ma, Y., 1998). To produce the association rules, one must first identify the frequent itemsets—groups of items that appear frequently in transactions. Then, using support, confidence, and lift values, the association rules that emerge from these groups can be uncovered. Let LLL denote an itemset, $L \rightarrow RL$ an associative rule, and TTT a collection of database transactions.

1. Support measures the frequency of occurrence of a set in the dataset.

$$sup(L) = \frac{freq(L)}{freq(T)} \quad (1)$$

$$sup(R) = \frac{freq(R)}{freq(T)} \quad (2)$$

Here, $freq(L)$ represents the number of times item LLL (the left side) appears in all transactions. The frequency of occurrence of item RRR (the right side) in all transactions, denoted by $freq(T)$, is referred to as $freq(R)$.

2. Confidence indicates the likelihood that the association rule is true based on its historical occurrence in many instances.

$$conf(L \rightarrow R) = \frac{sup(L, R)}{sup(L)} \quad (3)$$

Here, $sup(L, R)$ represents the frequency with which the itemsets LLL and RRR occur together.

3. Lift compares the observed support to the expected support under the assumption that LLL and RRR are independent.

$$lift(L \rightarrow R) = \frac{sup(L,R)}{sup(L) \times sup(R)} \quad (4)$$

Here, $sup(L)$ is the relative frequency of item LLL (the left-hand side), and $freq(T)$ is the total frequency of all transactions. Similarly, $sup(R)$ represents the relative frequency of item RRR (the right-hand side) in relation to the entire transaction set $freq(T)$.

Apriori Algorithm

The Apriori algorithm, first presented by R. Agrawal and R. Srikant in 1994 (Yuan, X., 2017), is considered a pioneering and fundamental approach for identifying frequent itemsets. The Apriori algorithm employs a two-step approach to explore candidates: (1) generating all frequent itemsets, where an itemset is considered frequent if its occurrence surpasses a predefined minimum support threshold, and (2) creating $(k+1)$ -itemsets based on the frequent k -itemsets that have already been explored, retaining only the frequent $(k+1)$ -itemsets. This effectively applies a priori pruning to eliminate infrequent $(k+1)$ -itemsets.

FP-Growth Algorithm

The FP-Growth algorithm uses a divide-and-conquer strategy to mine common database entries. It involves two database scans. In the initial scan, FP-Growth creates the F-List, which is a list of frequent items sorted by frequency in descending order. The second scan compresses the database into an FP-tree (Li, H., Wang, Y., Zhang, D., et al., 2008). Once the FP-tree is constructed, FP-Growth recursively mines the tree to identify frequent itemsets. It does so by building a conditional FP-tree for each item whose support is greater than a predefined threshold. This recursive process involves constructing and searching trees to uncover frequent itemsets, effectively converting the problem of finding frequent itemsets into a tree-based search problem.

Methodology

In this research, we evaluate the performance of the Apriori and FP-Growth algorithms in conducting a market basket analysis for OTOP products, focusing on execution time and the number of generated rules. The methodology for this experiment is structured around

the data mining process, which includes preprocessing, modeling, and postprocessing, as described below.

1. Preprocessing

The datasets from Nan OTOP are used in the experiment and are processed through three sub-processes: data cleaning, data selection, and data transformation. The preprocessing steps are as follows:

- **Data Cleaning:** The Nan OTOP dataset is collected from two sources: (1) the NAN OTOP Center (577,861 records from 2016 to 2022) and (2) the Peanut House (77,758 records from 2019 to 2022). The details of the datasets are shown in Table 1.

Table 1 Statistics of Each Dataset

Detail	Nan OTOP Center (records)	Peanut House (records)
Product	3,841	569
Sale transactions	212,507	24,946
Sale Item Transactions	577,861	77,758

- **Data Selection:** Nine features are available for analysis: PAYMENT-NO, PAYMENT-DATE, PRODUCT-ID, PRODUCT-NAME, QUANTITY, CATEGORY-NAME, STORE-ID, and STORE-NAME. For our analysis, we selected three features: PAYMENT-NO (which defines the sale transaction), PAYMENT-DATE (which indicates the sale date), and PRODUCT-ID (which identifies the product). Since association rule learning is based on the relationships between items, we eliminated transactions that contained only a single item. Additionally, PAYMENT-NO and PRODUCT-NAME were replaced with TRANSACTION-ID and ITEMS, respectively.

- **Data Transformation:** The dataset is transformed into JSON file format. One-to-one transactions are converted into multiple-item sales transactions. For example, if both transactions with PAYMENT-NO (199379) and PAYMENT-NO (199380) contain the same PRODUCT-ID (101472), both PAYMENT-NOs are removed. However, if transaction PAYMENT-NO (199381) is associated with PRODUCT-ID (101588) and PRODUCT-ID (101589), this transaction is retained for model creation.

2. Modeling

After data processing, we compare the performance of two algorithms: Apriori and FP-Growth, focusing on execution time and the number of generated association rules. The modeling processes are described as follows:

- **Analysis:** Now that the dataset is prepared for analysis, we will determine the likelihood that consumers who purchased item L from the Nan OTOP products also purchased item R from the same group. This information is essential for the Peanut House and Nan OTOP Center to decide whether to reorder new items from the same group (item R).

- **Formalization:** To assist with the analysis, we will look for pairwise association rules in the dataset and calculate the confidence $\text{conf}(\text{itemL} \rightarrow \text{itemR})$ of the item pairs, as described in the preceding equation (Equation 3). We will only consider instances where item $L \rightarrow \text{item R}$ occurs a minimum of MIN-COUNT times, and the calculated confidence value exceeds the THRESHOLD. If the association rules extracted from the Nan OTOP dataset include item $L \rightarrow \text{item R}$, then the Nan OTOP Center will contemplate reordering it. We have effectively completed the two phases of association rule mining and are now ready to implement the algorithms.

- **Algorithms:** The association rules from the Apriori algorithm are generated based on the frequency with which item L and item R occur together. The lift value is calculated by taking the ratio of the frequency of item L to the total number of transactions (T) and the ratio of the frequency of item R to the total number of transactions (T). Meanwhile, a list of frequent items is sorted by their frequency in descending order, and the database is compressed into the FP-tree. The FP-Growth algorithm then recursively mines the tree to identify frequent itemsets until the support value exceeds a predefined threshold. We use the generated rules in the format $\text{itemL} \rightarrow \text{itemR}$. Thus, the condition for the rule is that the lift value must be greater than 1, and the output is sorted by confidence value in descending order.

3. Post-Processing

In this experiment, 2,200 association rules were generated, and we need to refine these rules based on the following criteria:

- Set the minimum support and minimum confidence thresholds to ensure the frequency of the itemsets is sufficiently high. If multiple rules have the same maximum confidence, the lift value will be used as a tiebreaker.

- Eliminate ordered products that appear on the shelf, and select only the left-hand side of products that have corresponding sales transactions.

- Use the permutation method (Ketui, N., Wisomka, W., & Homjun, K., 2019) to generate candidate rules and identify the most significant rules.

Experimental Results and Discussion

In our experiment, we analyzed the execution time of two algorithms and studied the number of rules generated. Figures 1 (a) and (b) show the execution times of the algorithms based on the Peanut House dataset and the Nan OTOP Center dataset. The Apriori algorithm (ALL) was executed without imposing any conditions on minimum support or minimum confidence (MIN-SUP and $\text{MINCONF} \geq 0$).

For the Peanut House dataset, the transactions ranged from 780 to 15,600 records. We found that the execution time of the Apriori algorithm outperformed that of the FP-Growth algorithm (see Figure 1 (a)). In contrast, when we considered the Nan OTOP Center dataset, which included approximately 6,000 to 120,000 transactions, the FP-Growth algorithm exhibited longer execution times than the Apriori algorithm (Figure 1 (d)).

As shown in Figure 1, the Apriori algorithm is suitable for both OTOP datasets, even though they differ significantly. This effectiveness can be attributed to the simplicity of the Apriori algorithm, which operates based on the frequency of product sets.

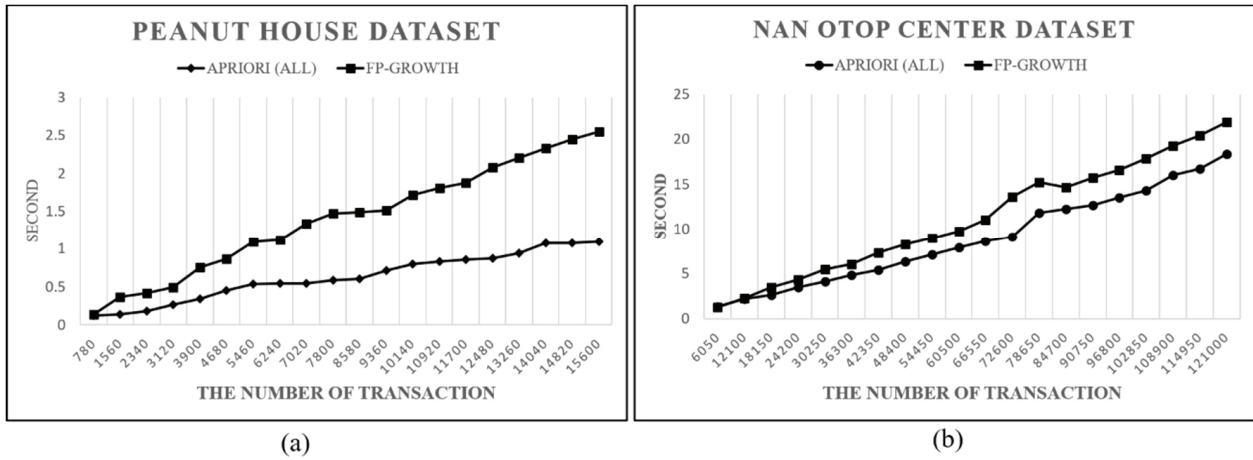


Figure 1 The execution times of peanut house (a) and Nan OTO center (b) datasets.

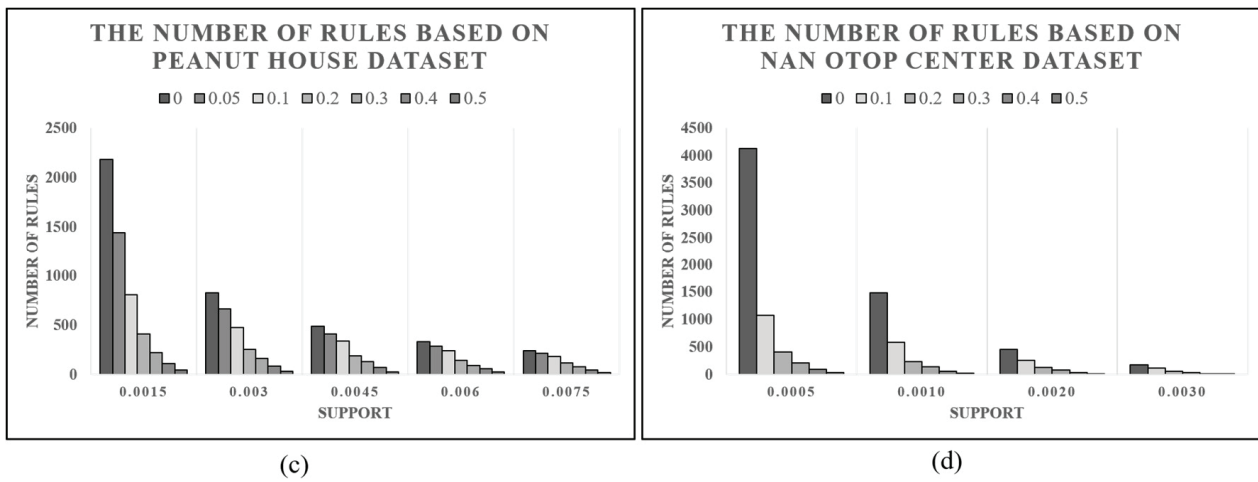


Figure 2 A Comparison of Association Rules Generation.

On the other hand, the number of rules is considered. We found that both datasets generated an equal number of rules using two methods: the Apriori and FP-growth algorithms (Figure 2(c)). In the peanut house dataset, the support value on the x-axis ranges from 0.0015 to 0.0075, while the y-axis indicates the number of rules. The highest number of rules in this instance is 2,200, with the confidence value close to 0. This bar chart displays five confidence values ranging from 0 to 0.5. Figure 2(d) shows the number of rules generated from the Nan OTO center dataset. At a support value of 0.0030, the minimum number of rules is generated. Although the dataset contains many products, the frequency of occurring transactions is very important for generating rules. Following our experiment, the generated rules will

be stored in the cloud and selected based on conditions such as minimum support ($\text{MIN-SUP} \geq 0.001$) and minimum confidence ($\text{MIN-CONF} \geq 0.3$), as well as a permutation method for reducing the related products as the rules.

A Background Process with API

After gathering the rules, we implement a process using an application programming interface (API) for the Nan OTO recommendation system. Our API is designed to receive new datasets and create new rules. Its functions can check the number of transactions, the user status, and the item recommendations in the TOP-10 (ranked by confidence value). We will use this API to prepare the Nan OTO recommendation system in the future.

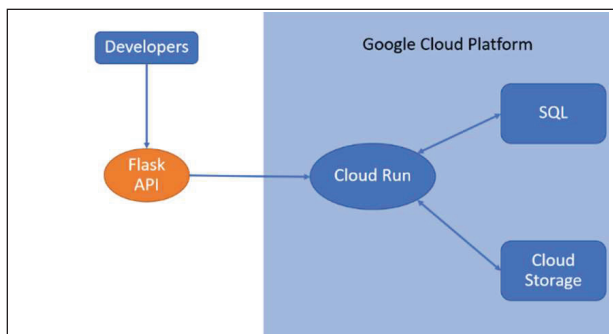


Figure 3 Process of the API.

In Figure 3, the API runs on Cloud Run and has connections between SQL (DATABASE) and Cloud Storage within the Google Cloud Platform. Cloud Run operates similarly to a Docker container, with an image created from Cloud Build and then deployed to Cloud Run. The image is stored in the Container Registry. To connect Cloud Run and SQL (MySQL) within the Google Cloud Platform, a VPC (Virtual Private Cloud) network must be used, providing a private IP for SQL to serve as the host. After that, we created an application to call the API. An example of calling the API to request a list of product recommendations involves specifying the PRODUCT-NAME or PRODUCT-ID based on the data uploaded to create the rules. The number of rules received depends on the limit value set during the rule creation process.

Nan OTOP’s Recommendation Application

In this work, we have developed the OTOP Market Basket application based on data mining principles, selecting appropriate rules using established mathematical methods, and identifying groups of products that reveal interesting relationships through association rule discovery. The software and hardware utilized in our implementation are as follows: The web-based application was developed using the PHP (Personal Home Page) programming language. The original examinations and statistical results were stored in a MySQL database, which was designed for the association rules. All programming was done using a Python editor. The maximum related products will be displayed in the Top-10 when we click on each product.

We can access the application from the main page, which features eleven categories of Nan OTOP products, such as local cloth, agricultural food, drinks,

souvenirs, etc. Figure 4 illustrates the details of Nan OTOP’s products on the left-hand side of the rules. In this case, the product is chewing mulberry. Each product entry includes a picture, name, price, category, access time, and the owner’s contact information. When we click on an interesting product on the website, the detailed product information is shown on the right-hand side (Figure 4). The recommended products are displayed below on the same page (Figure 5).

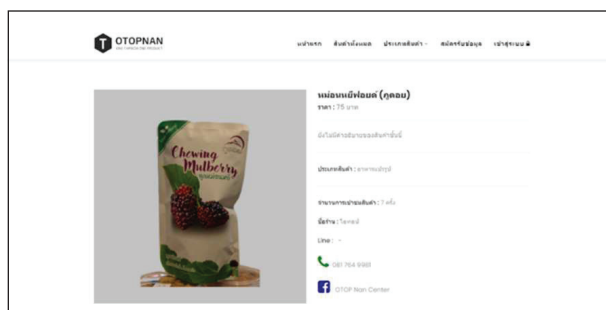


Figure 4 Detailed representation of a Nan OTOP’s product.

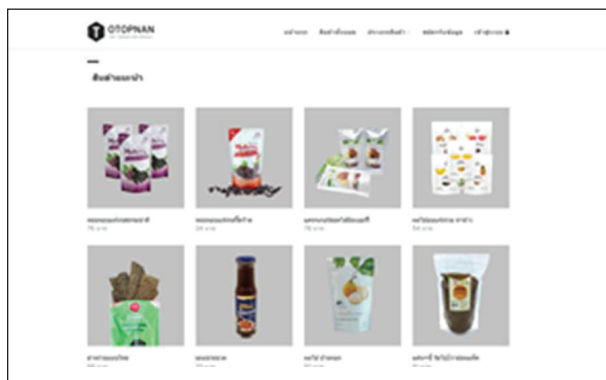


Figure 5 Recommended products selected from association rules.

The relationships between the left-hand side products are shown in Figure 6. The most recommended products are mulberry agriproducts and dried fruits, reflecting the actual situation in OTOP shops. In our system, the related products are determined in the Top-10 based on the conditions of our experiment.

User Satisfaction

Nan OTOP’s Recommendation Application was evaluated using 100 examples and 10 questions. A 1-to-5 satisfaction scale was employed to measure user satisfaction or dissatisfaction with functionality, performance, and usability. The users’ responses are shown in Table 2.

The average overall user satisfaction is 4.72 (very satisfied), with a standard deviation of 0.59. Users reported that the website clearly displays information and provides recommended results based on interesting products. The website is designed similarly to e-commerce platforms, making it easy to access and use.

Table 2 User Satisfaction with Nan OTOP’s Recommendation Application.

Satisfaction	\bar{x}	S.D.	Scale
Display clearly	4.8	0.40	Very satisfied
Enough information	4.2	0.75	Satisfied
Completeness data	4.6	0.80	Very satisfied
Fast to retrieve data	4.8	0.40	Very satisfied
Easy to navigate	4.91	0.29	Very satisfied
Access to the recommended product	4.60	0.49	Very satisfied
Number of products available for shopping	4.60	0.49	Very satisfied
Saving time for shopping	4.91	0.29	Very satisfied
Web design: color, font, picture, etc.	4.91	0.29	Very satisfied
Works on various browsers such as Chrome, Safari, Firefox.	4.89	0.32	Very satisfied
Overall	4.72	0.59	Very satisfied

Users who responded to the questionnaire suggested that adding more of the newest Nan OTOP products to the corpus would keep the related promotions up-to-date for entrepreneurs and assist customers in their decision-making. For example, if a tourist buys dried peanuts, the recommended products might include cookies made from peanut ingredients. In another case, if sun-dried wampee is selected, other dried fruit products would be suggested. Thus, the recommendation system would help entrepreneurs set promotions during festivals and support customers in making product decisions.

Conclusion

In this work, we aimed to support the economy of Nan tourism by enhancing the Nan OTOP recommendation system. The challenge is that tourists often struggle to

determine which of the hundreds of product items are the most popular for use in item packages. We utilized two algorithms for association rule learning: Apriori and FP-growth, to evaluate their performance. Association rule mining algorithms can be divided into three major categories: (1) frequent itemset mining, (2) sequential pattern mining, and (3) structured pattern mining.

In our comparison of the two algorithms, we evaluated their execution time and the number of rules generated using two large datasets from the peanut house and Nan OTOP center. Our investigation showed that the Apriori algorithm outperforms the FP-growth technique. During the rule generation experiment, both methods produced an equal number of rules. The recommendation system can utilize these associated rules to determine related products.

In future work, we will explore additional data mining techniques to improve performance and increase the number of association rules generated.

Acknowledgment

This research was funded by the Research and Development Institute (RDI) of Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand, under the Fundamental Fund Project Number 2565FFFP062. We would also like to thank the Artificial Intelligence Association of Thailand (AIAT) for providing academic resources.

References

Aldino, A. A., Pratiwi, E. D., Sintaro, S., & Putra, A. D. (2021, October). *Comparison of market basket analysis to determine consumer purchasing patterns using fp-growth and apriori algorithm*. In 2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE) (pp. 29-34). IEEE.

Agrawal, R., Imieliński, T., & Swami, A. (1993, June). Mining association rules between sets of items in large databases. In *Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD international conference on Management of data* (pp. 207-216).

Al-Maolegi, M., & Arkok, B. (2014). *An improved Apriori algorithm for association rules*. *arXiv preprint arXiv:1403.3948*.

- Fadillah, A. R., Yulita, I. N., Pradana, A., & Suryani, M. (2021, October). Data Mining Implementation Using Frequent Pattern Growth on Transaction Data for Determining Cross-selling and Up-selling (Case Study: Cascara Coffee). In *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data Analytics* (pp. 1-6). IEEE.
- Fatoni, C. S., Utami, E., & Wibowo, F. W. (2018, December). Online store product recommendation system uses apriori method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1140, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.
- Goebel, V. (2014). *Knowledge Discovery in Databases (KDD) and Data Mining (DM)*. University of Oslo. Department of Informatics.
- Hossain, M., Sattar, A. S., & Paul, M. K. (2019, December). Market basket analysis using apriori and FP growth algorithm. In *2019 22nd international conference on computer and information technology (ICCIT)* (pp. 1-6). IEEE.
- Ketui, N., Wisomka, W., & Homjun, K. (2019). Association rule mining with permutation for estimating students' performance and its smart education system. *Journal of Computers*, 30(2), 93-102.
- Liu, B., Hsu, W., & Ma, Y. (1998, August). Integrating classification and association rule mining. In *Proceedings of the fourth international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 80-86).
- Li, H., Wang, Y., Zhang, D., Zhang, M., & Chang, E. Y. (2008, October). Pfp: parallel fp-growth for query recommendation. In *Proceedings of the 2008 ACM conference on Recommender systems* (pp. 107-114).
- Patil, M., & Patil, T. (2022). *Apriori Algorithm against Fp Growth Algorithm: A Comparative Study of Data Mining Algorithms*. Available at SSRN 4113695.
- Singh, P. K., Sinha, M., Das, S., & Choudhury, P. (2020). Enhancing recommendation accuracy of item-based collaborative filtering using Bhattacharyya coefficient and most similar item. *Applied Intelligence*, 50, 4708-4731.
- Tareq, S. U., Noor, M. H., & Bepery, C. (2020). Framework of dynamic recommendation system for e-shopping. *International Journal of Information Technology*, 12(1), 135-140.
- Yuan, X. (2017, March). An improved Apriori algorithm for mining association rules. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1820, No. 1). AIP Publishing.

การสร้างลาเบลสังเคราะห์สำหรับการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมผ่านการเรียนรู้แบบมีผู้สอนด้วยการแทนค่าด้วยตัวเอง

Generating synthetic labels for satellite image classification through self-supervised representation learning

ศรัณย์ กุลยานนท์¹, วสิศ ลิ้มประเสริฐ¹, ปกป้อง ส่องเมือง² และ รัชฎา คงคะจันทร์¹

Sarun Gulyanon¹, Wasit Limprasert¹, Pokpong Songmuang² and Rachada Kongkachandra¹

Received: 29 November 2023 ; Revised: 15 January 2024 ; Accepted: 9 February 2024

บทคัดย่อ

ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมมักนิยมใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกแบบมีผู้สอน แต่เทคนิคนี้ต้องใช้ชุดข้อมูลที่มีลาเบล (Label) จำนวนมาก และการเก็บข้อมูลลาเบลมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในด้านแรงงานคนและทรัพยากรอื่น ๆ ในขณะที่ปัจจุบันมีฐานข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ไม่มีข้อมูลลาเบลเป็นจำนวนมาก ที่สามารถใช้ได้ทั้งในเชิงพาณิชย์และทางวิชาการ เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนข้อมูลลาเบลอย่างไร้ข้อบกพร่องในการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการเพื่อใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ไม่มีลาเบลเหล่านี้ โดยอาศัยเทคนิคการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเอง (Self-Supervised Representation Learning) เพื่อสร้างข้อมูลลาเบลเทียมที่ทำหน้าที่เป็นชุดข้อมูลสอนสำหรับเทรนโมเดลการเรียนรู้แบบมีผู้สอนอีกที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่เทรนด้วยข้อมูลลาเบลเทียมมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับโมเดลที่เทรนด้วยข้อมูลลาเบลจริง แต่ใช้ข้อมูลลาเบลน้อยกว่าถึง 9 เท่า โดยมีความแม่นยำ 75% บนชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมัน และ 86% บนชุดข้อมูลป่าแอมะซอน นอกจากนี้กระบวนการสร้างข้อมูลลาเบลเทียมยังให้เวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature Vector) ที่มีความยืดหยุ่นและสามารถถ่ายทอดความรู้ไปใช้ในการแก้ปัญหาอื่นที่คล้ายกันได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การเรียนรู้เชิงลึก, การจำแนกภาพ, การสร้างข้อมูลลาเบล, ภาพถ่ายดาวเทียม, การเรียนรู้ด้วยตนเอง, เวกเตอร์คุณลักษณะ

Abstract

Supervised deep learning techniques are state-of-the-art methods in satellite image analysis; however, this technique requires a large, labeled dataset. The acquisition of such datasets is expensive in terms of both manpower and resources. Conversely, there is an abundance of raw satellite images, available for both commercial and academic purposes. To address the scarcity of labeled data in satellite image classification, this study presents a novel method to utilize these unlabeled data. It uses self-supervised learning technique to create synthetic labels that act as a training dataset for supervised learning models. Experimental results show that models trained with synthetic labels perform comparably to those trained with real labels, using 9 times fewer labeled data, achieving 75% accuracy on the palm oil plantation dataset and 86% accuracy on the Amazon rainforest dataset. Additionally, the process of generating synthetic labels yields versatile and knowledge-transferable visual representation vectors.

Keywords: Deep learning, image classification, label synthesis, satellite imaging, self-supervised learning, feature vector

¹ วิทยาลัยสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี 12120

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี 12120

¹ College of Interdisciplinary Studies, Thammasat University, Pathum Thani 12120

² Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120

* Corresponding author: Email sarung@tu.ac.th

บทนำ

ในยุคของข้อมูลใหญ่ มีข้อมูลอยู่มากหลายโดยเฉพาะข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล ที่มีภาพถ่ายดาวเทียมขนาดเพตะไบต์ (เช่น ข้อมูลภาพจาก Sentinel-2) ที่เปิดให้สาธารณะได้ใช้ประโยชน์ ในขณะที่เดียวกันการคิดค้นเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) เมื่อเกือบสิบปีที่ผ่านมา ทำให้เรามีเครื่องมือที่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลปริมาณมหาศาลนี้ได้ การเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) โดยเฉพาะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (supervised learning) กลายเป็นเทคนิคที่ทรงพลังที่สุดในหลายด้าน เช่น คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Russakovsky *et al.*, 2015) และการสำรวจระยะไกล (Demir *et al.*, 2018) การเรียนรู้แบบมีผู้สอนสามารถแก้ไขปัญหาใด ๆ ที่สามารถอธิบายได้ด้วยคู่ของข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ที่คาดหวังจากข้อมูลนำเข้านั้น เมื่อมีจำนวนข้อมูลตัวอย่างและทรัพยากรคำนวณเพียงพอ

ปัญหาหลักของการใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก คือ ปริมาณชุดข้อมูลลาเบลที่มีไม่เพียงพอ สำหรับโจทย์ทั่วไป เช่น การตรวจหาวัตถุและระบุตำแหน่ง ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย นั้นไม่มีปัญหาเรื่องปริมาณข้อมูลลาเบล เนื่องจากมีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจเรื่องนี้ และช่วยกันสร้างข้อมูลลาเบลปริมาณมากได้ ดังที่เห็นได้ในงานวิจัยของ Russakovsky *et al.* (2015) แต่สำหรับงานที่เฉพาะเจาะจง การเก็บข้อมูลลาเบลเป็นเรื่องท้าทาย เพราะมีผู้ให้ความสนใจและกำลังคนในการระบุข้อมูล ลาเบลน้อย อีกทั้งสำหรับบางงาน อาจต้องการผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในการระบุข้อมูลลาเบลอีกด้วย ทำให้การเก็บข้อมูลลาเบลที่ถูกต้องและมีปริมาณมากพอสำหรับการสร้างโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกเป็นเรื่องยาก

ในงานวิจัยนี้ เน้นที่ปัญหาข้อมูลลาเบลมีไม่เพียงพอในการสร้างหรือเทรนโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องให้มีประสิทธิภาพได้ สำหรับโจทย์การจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมในการทดลองจะอิงจากสถานการณ์ปัจจุบัน ที่มีปริมาณข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมพร้อมข้อมูลลาเบลน้อย และมีข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ไม่มีข้อมูลลาเบลจำนวนมาก วิธีการนี้ใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ไม่มีลาเบลด้วยวิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเอง (self-supervised learning) กระบวนการของเราเริ่มต้นด้วยสร้างโมเดลแทนภาพด้วยเวกเตอร์ (embedding vector) ด้วยเทคนิค SimCLR (Chen, Kornblith, Norouzi, & Hinton, 2020) แล้วจึงสร้างโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง เช่น support vector machine (SVM) (Cortes & Vapnik, 1995) ในการจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมที่มีข้อมูลลาเบล โดยใช้เวกเตอร์แทนภาพเป็นข้อมูลนำเข้าแทน จากนั้นเราใช้โมเดลที่ได้นี้ทำนายข้อมูลลาเบลให้กับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ไม่มีข้อมูลลาเบล และเรียกผลลัพธ์ที่ได้นี้ว่า “ข้อมูลลาเบลเทียม” สุดท้ายจึงใช้ชุดข้อมูลนำเข้าพร้อมข้อมูลลาเบลเทียมรวมทั้งข้อมูลนำเข้าพร้อมข้อมูลลาเบลจริงในการเทรนโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องที่ต้องการ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการอัตโนมัติในการสร้างข้อมูลลาเบลเทียมและแสดงให้เห็นว่าโมเดลสำหรับโจทย์การจำแนกที่เทรนด้วยป้ายชื่อเทียมให้ผลลัพธ์ที่ดีใกล้เคียงกับโมเดลเทรนด้วยข้อมูลลาเบลจริง จากการทดลองพบว่าวิธีการของเราใช้ข้อมูลที่มีลาเบลน้อยลงถึง 9 เท่าในขณะที่ผลลัพธ์นั้นมีความแม่นยำใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าการคำนวณเวกเตอร์แทนภาพด้วยวิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองจากข้อมูลที่ไม่มีลาเบลสามารถสร้างเวกเตอร์ที่บ่งบอกคุณสมบัติทั่วไปและมีความยืดหยุ่นสามารถใช้ในการแก้ปัญหาเหมือนกันในโดเมนเดียวกันได้

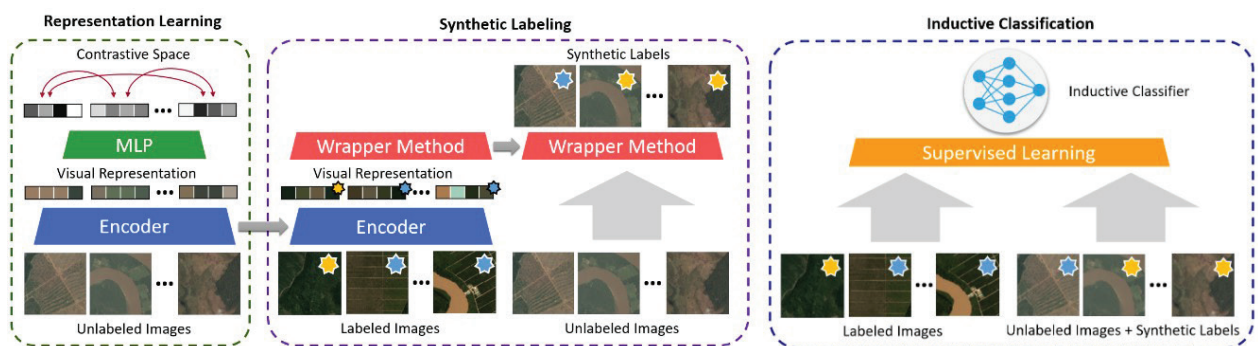


Figure 1 The overview of our method that comprises three steps: representation learning, synthetic-labeling, and inductive classification. (Left) the representation learning step learns the visual representation encoder. (Middle) the synthetic labeling utilizes the previously learned encoder to generate the synthetic labels for unlabeled data. (Right) the inductive classification trains a supervised model on both the training set and the unlabeled set with their corresponding synthetic labels.

วิธีการศึกษา

กำหนดให้ $\mathcal{D} = \{x_i\}$ สำหรับ $i = 1, \dots, N$ แทนเซตของภาพถ่ายดาวเทียมที่ไม่มีข้อมูลลาเบล (x_i) และ $\mathcal{D} = \{(x_j, y_j)\}$ สำหรับ $j=1, \dots, M$ แทนเซตของภาพถ่ายดาวเทียม (x_j) ที่มีข้อมูลลาเบล (y_j) โดยที่ $N \gg M$

วิธีการของเรามีสามขั้นตอน คือ 1) การเรียนรู้การแทนภาพ (representation learning) 2) การสร้างข้อมูลลาเบลเทียม (synthetic-labeling) และ 3) การจำแนกแบบอุปนัย (inductive classification) (Figure 1)

1. การเรียนรู้การแทนภาพ

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนแรก คือ การหาเวกเตอร์แทนภาพ ซึ่งทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยม คือ วิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเอง (self-supervised learning) ซึ่งเป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning) แต่ทำเสมือนเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอน ความแตกต่างคือ ข้อมูลลาเบลจะถูกสร้างโดยอัตโนมัติจากข้อมูลนำเข้า ซึ่งอาจไม่เกี่ยวข้องกับโจทย์ปัญหาที่สนใจก็ได้ วิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ pretext tasks และ downstream tasks (Jing & Tian, 2020)

ขั้นตอน pretext tasks หมายถึง โจทย์การเรียนรู้แบบมีผู้สอนที่ถูกออกแบบเพื่อช่วยในการสร้างเวกเตอร์แทนภาพที่มีความยืดหยุ่นและสามารถถ่ายทอดความรู้ไปใช้ในการแก้ปัญหาอื่นที่คล้ายกันได้ ด้วยการทำนายข้อมูลลาเบลที่สร้างจากข้อมูลนำเข้า ในขณะที่ downstream tasks หมายถึง โจทย์ที่ใช้ประโยชน์จากเวกเตอร์แทนภาพที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยการสร้างโมเดลที่ใช้เวกเตอร์แทนภาพเป็นข้อมูลนำเข้าบนชุดข้อมูลที่มีข้อมูลลาเบล โดยเราวัดคุณภาพของเวกเตอร์แทนภาพจากประสิทธิภาพของโมเดลในโจทย์ downstream tasks

เทคนิควิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การเรียนรู้แบบเปรียบเทียบ (contrastive learning) นำเสนอโดย Hadsell *et al.* (2006) ซึ่งเรียนรู้เวกเตอร์แทนภาพโดยการเปรียบเทียบตัวอย่างกับข้อมูลที่มีลาเบลเหมือนกันและต่างกัน วิธีการประเภทนี้ที่ได้รับความนิยม ชื่อ SimCLR (Chen, Kornblith, Norouzi, & Hinton, 2020; Chen, Kornblith, Swersky, *et al.*, 2020) ซึ่งนำเสนอเฟรมเวิร์คง่าย ๆ สำหรับการเรียนรู้แบบเปรียบเทียบ ด้วยการหาโมเดลที่ให้เวกเตอร์แทนภาพที่สอดคล้องกันของข้อมูลนำเข้าเดียวกัน แต่ถูกดัดแปลงต่างกัน

เราได้นำวิธีการ SimCLR มาใช้สร้างเวกเตอร์แทนภาพจากทั้งข้อมูลที่ไม่มีลาเบล \mathcal{D} และข้อมูลที่มีลาเบล \mathcal{D} เวกเตอร์แทนภาพ h_i ถูกสร้างโดยใช้โมเดล encoder f กับข้อมูลนำเข้าที่ถูกดัดแปลง $t(x_i)$:

$$h_i = f(t(x_i), \theta)$$

โดย θ คือพารามิเตอร์ของ f และ t คือการดัดแปลงข้อมูลแบบสุ่ม

แล้วเวกเตอร์แทนภาพจึงถูกแปลงเป็นเวกเตอร์ z_i สำหรับการเรียนรู้แบบเปรียบเทียบ ด้วยโมเดล multi-layered perceptron (MLP) g ที่มีพารามิเตอร์ W :

$$z_i = g(h_i, W)$$

โดยฟังก์ชันเป้าหมาย ใช้ NT-Xent loss (Chen, Kornblith, Norouzi, & Hinton, 2020), ซึ่งจะหาโมเดลที่ให้เวกเตอร์ z_i ของข้อมูลนำเข้าเดียวกันแต่ถูกดัดแปลงต่างกัน ให้สอดคล้องกันมากที่สุด โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\theta^* = \arg \min_{\theta, W} \mathcal{L}$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N [l(2k-1, 2k) + l(2k, 2k-1)]$$

$$l(i, j) = -\log \frac{\exp(\text{sim}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j)/\tau)}{\sum_{k=1}^{2N} \mathbf{1}_{[k \neq i]} \exp(\text{sim}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_k)/\tau)}$$

โดย $\text{sim}(z_i, z_j)$ คือ ค่า cosine similarity ระหว่างเวกเตอร์ z_i และ z_j ส่วน $\mathbf{1}_{[k \neq i]} \in \{0, 1\}$ เป็นฟังก์ชันที่มีค่าเป็น 1 ถ้า $k \neq i$ มิเช่นนั้นเป็น 0 ฟังก์ชันเป้าหมายถูกคำนวณเฉพาะคู่ของเวกเตอร์แทนภาพของข้อมูลในชุดข้อมูลที่มีลาเบลเหมือนกันเท่านั้นทั้ง (z_i, z_j) และ (z_j, z_i) (Chen, Kornblith, Norouzi, & Hinton, 2020)

2. การสร้างข้อมูลลาเบลเทียม

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้คือการสร้างข้อมูลลาเบลเทียมของข้อมูลที่ไม่มีลาเบล \mathcal{D} ต่อไป โดยเราได้เลือกใช้เทคนิค Wrapper ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการประเภทการเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอน (semi supervised learning) การเรียนรู้ประเภทนี้ใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ไม่มีลาเบลซึ่งมักเก็บข้อมูลได้ง่ายและมีจำนวนมาก ร่วมกับข้อมูลที่มีลาเบลที่มักต้องใช้ทรัพยากรมากในการเก็บข้อมูลและมีจำนวนน้อยเพื่อสร้างโมเดลที่ดีขึ้น (Zhu, 2005; Chapelle *et al.*, 2006; van Engelen & Hoos, 2020)

เทคนิคการเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอนสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทตามวัตถุประสงค์ คือ วิธีแบบ Inductive กับ วิธีแบบ Transductive โดยวิธีแบบ Inductive จะสร้างฟังก์ชันที่สามารถทำนายลาเบลของข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้ ในขณะที่วิธีแบบ Transductive จะคำนวณลาเบลของข้อมูลที่ไม่มีลาเบลโดยไม่ใช้ฟังก์ชันทำนาย (van Engelen & Hoos, 2020)

โดยเราเลือกใช้เทคนิค Wrapper ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีแบบ Inductive ที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับ ซึ่งประกอบด้วย

2 ขั้นตอน คือ การเทรนบนข้อมูลที่มีลาเบล และการสร้างลาเบลเทียมให้ข้อมูลที่ไม่มีลาเบล ขั้นแรกโมเดล Wrapper F ถูกเทรนบนเวกเตอร์แทนภาพ $\{(h_j, y_j)\}$ ของข้อมูลที่มีลาเบล D จากนั้นจึงใช้โมเดล Wrapper F เพื่อสร้างข้อมูลลาเบลเทียม y_i ให้ข้อมูลที่ไม่มีลาเบล D

$$y_i = F(x_i)$$

3. การจำแนกแบบอุปนัย

ขั้นตอนสุดท้ายนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างโมเดลจำแนกทั้งจากข้อมูลที่มีลาเบล D และข้อมูลที่ไม่มีลาเบลกับข้อมูลลาเบลเทียม $\{(x_i, y_i)\}$ เป็นชุดข้อมูลสอน โดยโมเดลจำแนกนี้สามารถใช้เทคนิคใดก็ได้ เพราะ ชุดข้อมูลนี้เสมือนเป็นชุดข้อมูลที่มีลาเบลชุดหนึ่ง และไม่จำเป็นต้องใช้วิธีเดียวกับโมเดล Wrapper นี้คือคุณสมบัติที่มีประโยชน์ตามที่คำอธิบาย เรื่อง การกลั่นกรองความรู้ (Knowledge Distillation) (Hinton *et al.*, 2015) ที่เราสามารถสร้างโมเดลหนึ่งโดยใช้ความรู้จากอีกโมเดลได้

การใช้วิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองอย่าง SimCLR ในการคำนวณเวกเตอร์แทนภาพ ช่วยให้การสร้างโมเดล Wrapper ทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเดิมจะต้องสร้างโมเดล Wrapper ซ้ำหลายรอบบนชุดข้อมูลที่มีลาเบลจริง และชุดข้อมูลที่มีลาเบลเทียม จนกว่าข้อมูลลาเบลเทียมที่ได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พอสร้างโมเดล Wrapper บนเวกเตอร์แทนภาพก็ไม่มีคามจำเป็นที่จะต้องทำซ้ำ อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ก็ดีกว่าโมเดลที่ใช้ข้อมูลนำเข้าโดยตรง

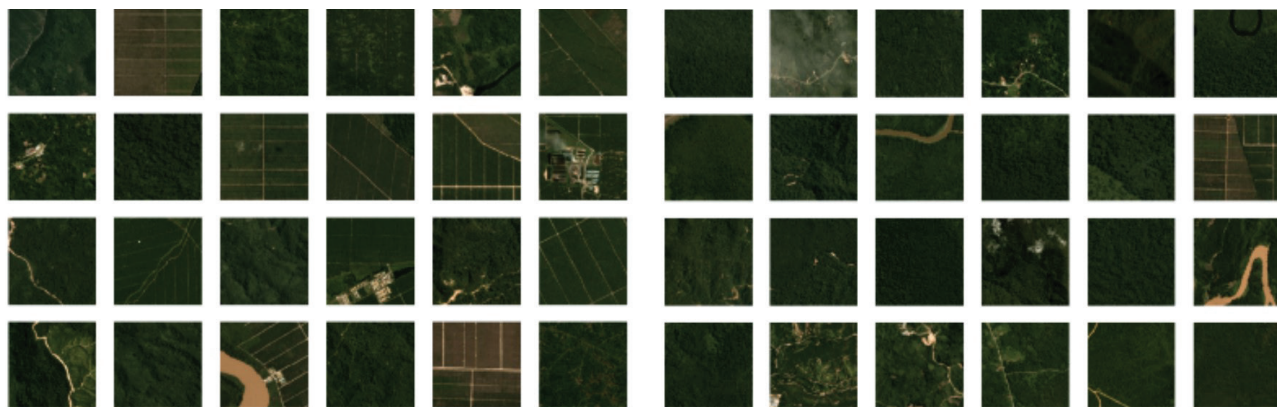


Figure 2 Palm oil plantation dataset. (Left) the images that contain palm oil plantation(s). (Right) the images that don't contain palm oil plantation.

ชุดข้อมูลป่าแอมะซอนเป็นภาพถ่ายดาวเทียมแบบ 4 แบนด์ที่มีความละเอียด 3 เมตรของลุ่มน้ำแอมะซอน ข้อมูลเหล่านี้ถูกเก็บรวบรวมโดยดาวเทียม Flock 2 ของ Planet ระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2016 ถึงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017 ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยภาพมากกว่า 40,000 ภาพพร้อมกับข้อมูลลาเบลที่ระบุสภาพอากาศและประเภทการใช้ที่ดิน ใน

การทดลอง

1. ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

เราทำการทดสอบวิธีการของเราโดยใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมสองชุด คือ ชุดข้อมูลภาพป่าแอมะซอนและชุดข้อมูลภาพไร่ปาล์มน้ำมัน ทั้งสองชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยรูปประเภท RGB ของภาพถ่ายดาวเทียมขนาด 256x256 พิกเซล แม้ว่าในความเป็นจริงข้อมูลในชุดข้อมูลเหล่านี้จะมีลาเบลทั้งหมด แต่เราจำลองสถานการณ์ที่ข้อมูลที่มีลาเบลมีน้อยเหมือนกับโจทย์ในงานวิจัยของ Kussul *et al.* (2017) กับ Heupel *et al.* (2018) โดยการสุ่มบางส่วนของชุดข้อมูลและลบข้อมูลลาเบลออกเพื่อสร้างชุดข้อมูลที่ไม่มีลาเบล การสุ่มลบข้อมูลลาเบลถูกทำเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาความซ้ำซ้อนในการเก็บข้อมูลและเตรียมข้อมูล ส่วนรายละเอียดของแต่ละชุดข้อมูลมีดังนี้

ชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมันเป็นรูปภาพ RGB ความละเอียด 3 เมตรที่รวบรวมโดยดาวเทียมของ Planet ข้อมูลลาเบลบ่งบอกว่ามีไร่ปาล์มน้ำมันปรากฏในภาพหรือไม่ ข้อมูลลาเบลนี้มาจากการระบุลาเบลโดยฝูงชน (crowdsourced annotation) โดยชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยภาพมากกว่า 15,000 ภาพ แต่เราสุ่มเพียง 1,885 รูปภาพเป็นข้อมูลที่มีลาเบล โดยมี 918 ภาพที่มีไร่ปาล์มน้ำมันปรากฏ (Liu *et al.*, 2019) (Figure 2)

งานนี้เราสุ่มเพียง 21,118 รูปภาพเป็นข้อมูลที่มีลาเบล และใช้ภาพ RGB แทนที่จะใช้ภาพแบบ 4 แบนด์ อีกทั้งลาเบลที่ใช้จะระบุแค่ว่ามีหรือไม่มีการเกษตรปรากฏในภาพหรือไม่ เพื่อให้ได้ปัญหาการจำแนกแบบทวิภาค โดยมีข้อมูลจำนวน 9,852 ภาพที่มีลาเบลการเกษตรปรากฏ (Goldenberg *et al.*, 2017) (Figure 3)



Figure 3 Amazon rainforest dataset. (Left) the images with agriculture label. (Right) the images without agriculture label.

2. วิธีการทดลอง

ทุกการทดลองประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ซีพียู AMD Ryzen 7 2700X 3.7GHz การ์ดจอ GeForce Nvidia RTX 2070 และ RAM 16 GB การ เทรนโมเดลทั้งสามขั้นตอน ใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง

การทดลองของเรามีเป้าหมายสองอย่าง คือ 1) ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกที่เทรนบน ข้อมูลลาเบลเทียม และ 2) ประเมินคุณภาพและความยืดหยุ่น ในการใช้ประโยชน์ของเวกเตอร์แทนภาพ

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนก ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลเทียม ส่วนที่หนึ่ง เราแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลลาเบลเทียมสามารถใช้เทรนโมเดลแทนข้อมูลลาเบล จริงได้ โดยเฉพาะในชุดข้อมูลขนาดเล็ก เราตรวจสอบโดยการ เทรนโมเดล Convolutional Neural Network (CNN) ที่เป็น pretrained model อย่าง VGG16 (Simonyan & Zisserman, 2014) นำมาเทรนบนทั้งข้อมูลลาเบลจริงและลาเบลเทียมเพื่อ เปรียบเทียบผลลัพธ์กัน โดยโมเดลอื่นที่ซับซ้อนมากกว่านี้ ก็สามารถใช้ได้เช่นกัน ในการทดลองนี้ลาเบลเทียมถูกสร้าง ขึ้นโดยใช้เทคนิค SVM เทรนบนเวกเตอร์แทนภาพที่คำนวณ โดยเทคนิค SimCLR ดังนั้นเราจึงเปรียบเทียบกับเทคนิค SVM นี้ด้วยบนทั้งข้อมูลลาเบลจริงและลาเบลเทียม เทียบผลลัพธ์ กับวิธีการของเรา ในส่วนที่สอง เราเปรียบเทียบเทคนิคการ เรียนรู้ของเครื่อง 3 เทคนิค เพื่อหาว่าเทคนิคใดใช้เป็นโมเดล Wrapper สร้างข้อมูลลาเบลเทียมได้ดีที่สุด โดยพิจารณาจาก ประสิทธิภาพของโมเดล VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลเทียม

สำหรับการประเมินคุณภาพและความยืดหยุ่นในการ ใช้ประโยชน์ของเวกเตอร์แทนภาพ ในส่วนแรก เราประเมิน คุณภาพของเวกเตอร์แทนภาพด้วยการแสดงผลเวกเตอร์แทน ภาพโดยใช้เทคนิคอย่าง t-SNE (van der Maaten & Hinton, 2008) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เวกเตอร์แทนภาพที่คำนวณด้วย เทคนิค SimCLR ช่วยให้การแยกแยะระหว่างภาพต่างคลาสนั้น

มีความชัดเจนมากขึ้น ในขณะที่ส่วนที่สอง เราแสดงให้เห็นว่า เวกเตอร์แทนภาพเหล่านี้มีความยืดหยุ่นในการใช้ประโยชน์ และสามารถถ่ายทอดความรู้ไปใช้แก้ปัญหาอื่นที่คล้ายกันได้ โดยการนำโมเดล encoder ที่เทรนบนชุดข้อมูลป่าแอมะซอน มาใช้กับภาพในชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมันในการคำนวณเวกเตอร์ แทนภาพ จากนั้นจึงใช้เวกเตอร์แทนภาพนี้สร้างลาเบลเทียม แล้วจึงนำลาเบลเทียมไปเทรนโมเดลจำแนกด้วยวิธีการของ เราต่อไป สุดท้ายจึงนำโมเดลนี้เทียบกับโมเดลอย่าง VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลจริงเท่านั้น

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ประสิทธิภาพในการจำแนกด้วยลาเบลเทียม

เราเปรียบเทียบวิธีการของเรา (Our method) กับ 1) โมเดล VGG16 (VGG16) และ 2) โมเดล SVM ที่เทรนบนเวก เตอร์แทนภาพคำนวณด้วยเทคนิค SimCLR (SimCLR+SVM) โดยโมเดลทั้งสองนี้ใช้เฉพาะข้อมูลลาเบลจริงเท่านั้น ส่วนโมเดล VGG16 ใช้เทคนิคการถ่ายทอดความรู้ (transfer learning) (Giorgiani do Nascimento & Viana, 2020) ด้วยการใช้ pretrained model ที่ได้จากการเทรนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่ อย่าง ImageNet (Russakovsky *et al.*, 2015) ส่วนโมเดล SVM ใช้ kernel เป็น radial basis function (RBF) ส่วน โมเดล SimCLR ใช้โมเดล ResNet18 (He *et al.*, 2016) เป็น โมเดล encoder

ในการประเมินจะใช้ค่าความแม่นยำ (Accuracy; Acc) ค่า precision (P) ค่า recall (R) และค่า F1-score (F1) เป็นเกณฑ์ ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$Acc=(tp + tn) / (tp + tn + fp + fn)$$

$$P=tp / (tp + fp)$$

$$R=tp / (tp + fn)$$

$$F1=2PR / (P+R)=2tp / (2tp + fp + fn)$$

โดย
 tp คือ จำนวนผลบวกจริง tn คือ จำนวนผลลบจริง
 fp คือ จำนวนผลบวกปลอม fn คือ จำนวนผลลบปลอม

ขั้นตอนการเตรียมภาพที่ใช้ในการทดลองมีเพียงการลดขนาดภาพเป็น 128×128 พิกเซล แม้ว่ากระบวนการก่อนการประมวลผลภาพจะมีผลกระทบมากต่อประสิทธิภาพ (D.R. et al., 2017) แต่เรื่องนี้ไม่ใช่สิ่งที่เราต้องการศึกษา

เราจึงเลือกใช้วิธีที่ง่ายที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาข้อมูลที่ไม่สมดุล เราจึงสุ่มและแบ่งชุดข้อมูลเพื่อให้ทั้งชุดข้อมูลสอนและทดสอบมีจำนวนลาเบลในแต่ละคลาสที่ใกล้เคียงกัน โดยในชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมันมีภาพทดสอบ 193 ภาพ โดยมี 93 ภาพที่มีไร่ปาล์มน้ำมันปรากฏ ส่วนในชุดข้อมูลป่าแอมะซอนมีทั้งหมด 1,056 ภาพ โดยมี 493 ภาพมีลาเบลการเกษตรปรากฏ

Table 1 Comparison between the methods when 187 labeled data from palm oil plantation dataset are available.

Method	Acc.	P	R	F1
Our method	74.9	.798	.643	.712
VGG16	65.2	.708	.647	.636
SimCLR+SVM	74.1	.772	.656	.709

Table 2 Comparison between the methods when 1,055 labeled data from Amazon rainforest dataset are available.

Method	Acc.	P	R	F1
Our method	85.9	.897	.831	.863
VGG16	84.6	.851	.862	.856
SimCLR+SVM	84.4	.819	.854	.836

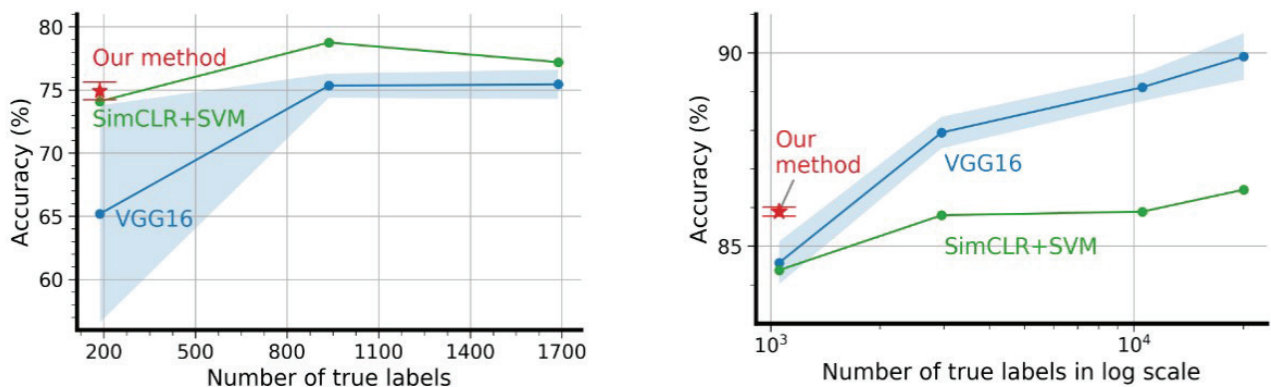


Figure 4 Accuracy comparison of different methods: our method (red), pre-trained VGG16 model (blue), and SVM over SimCLR features (green). The error bar and highlighted area show the range of one standard deviation of the mean from running the algorithm 5 times. The X-axis shows the number labeled data available to the algorithm. (Left) the result from Palm oil plantation dataset (Right) the result from Amazon rainforest dataset.

Table 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่าวิธีการของเราให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ในกรณีจำนวนข้อมูลลาเบลมีน้อย วิธีการของเรามีความแม่นยำสูงกว่าเกือบ 10% เมื่อเทียบกับโมเดล VGG16 ในชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมัน Figure 4 (Left) ยังแสดงว่าวิธีการของเราให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับโมเดล VGG16 เมื่อเทรน

บนชุดข้อมูลที่มีข้อมูลลาเบลมากกว่าถึง 9 เท่า เนื่องจากขั้นตอนบางขั้นตอนของอัลกอริทึม CNN มีขั้นตอนการสุ่ม เราจึงรายงานผลเฉลี่ยจากการทดลอง 5 รอบ ปรากฏการณ์นี้มีผลลดลงเมื่อจำนวนข้อมูลลาเบลมีสูงขึ้น ตามที่แสดงใน Figure 4 (Right) แต่ในโดเมนที่เฉพาะเจาะจง การเก็บข้อมูลลาเบลปริมาณมากเป็นเรื่องท้าทายมาก และกรณีที่ศึกษา

ก็เป็นกรณีที่ข้อมูลลาเบลมีปริมาณน้อย มีเช่นนั้นเราก็สามารถสร้างโมเดลจำแนกด้วยวิธีการทั่วไปได้ ถ้าเรามีปริมาณข้อมูลมาก

ในส่วนของ เราเปรียบเทียบเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง 3 เทคนิค คือ 1) SVM 2) k-nearest neighbor (kNN) และ 3) logistic regression (Logistic) เพื่อหาว่าเทคนิคใดเมื่อใช้เป็นโมเดล Wrapper สร้างข้อมูลลาเบลเทียมแล้ว จะช่วยสร้างโมเดลจำแนกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้โมเดล

VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลเทียมเป็นตัวเปรียบเทียบ อีกทั้งยังเทียบกับการใช้โมเดล Wrapper จำแนกผลลัพธ์โดยตรงเลยด้วย ผลลัพธ์ใน Table 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่า VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลเทียมให้ความแม่นยำสูงกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าโมเดลไม่เชิงเส้น เช่น SVM ที่มี kernel เป็น RBF และ kNN มักให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าโมเดลเชิงเส้น เช่น logistic regression

Table 3 Comparison between different wrapper methods and the VGG16 model trained on synthetic labels. 187 labeled data from palm oil plantation dataset are available.

Method	Acc.	VGG Acc.
SVM	74.1	74.9 ± 0.7
kNN	70.5	76.2 ± 0.9
Logistic	57.5	71.2 ± 2.0

Table 4 Comparison between different wrapper methods and the VGG16 model trained on synthetic labels. 1,055 labeled data from Amazon rainforest dataset are available.

Method	Acc.	VGG Acc.
SVM	84.4	85.2 ± 0.2
kNN	83.0	84.9 ± 0.5
Logistic	79.2	83.7 ± 0.5

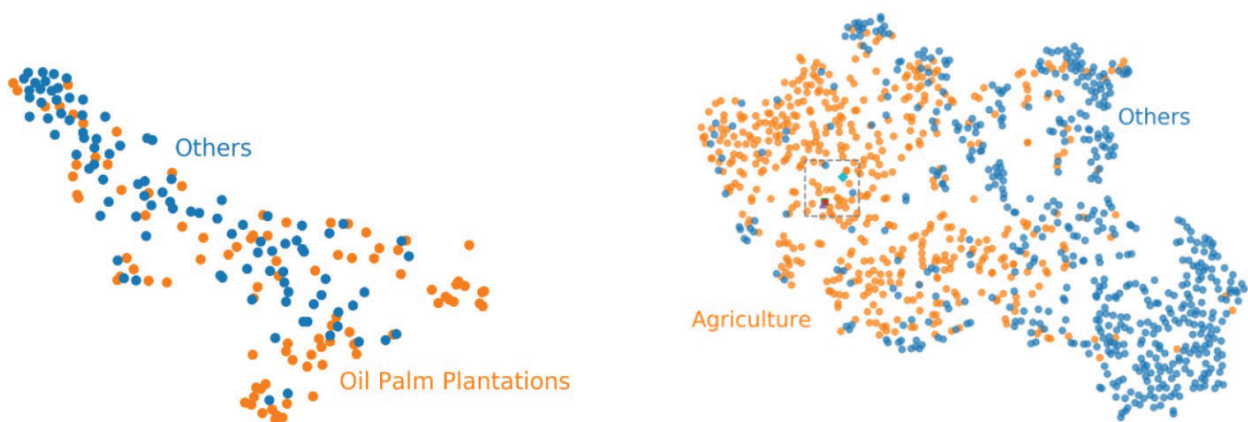


Figure 5 T-SNE visualization of visual representation vectors. The encoder function is optimized via self-supervised learning. (Left) Oil palm plantation training set. (Right) Amazon rainforest training set.

2. คุณภาพและความยืดหยุ่นของเวกเตอร์แทนภาพ

ในส่วนแรก เราประเมินคุณภาพของเวกเตอร์แทนภาพด้วยการแสดงผลเวกเตอร์แทนภาพโดยใช้เทคนิค t-SNE (van der Maaten & Hinton, 2008) ใน Figure 5 ในภาพทางซ้าย ซึ่งแสดงชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากภาพในชุดข้อมูลนี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างสองคลาสดังใน Figure 2

กราฟ t-SNE จึงแยกแยะจุดข้อมูลของภาพที่อยู่ต่างคลาสได้ยาก แต่ในขณะเดียวกัน ในภาพทางขวาที่แสดงชุดข้อมูลป่าแอมะซอน ภาพในชุดข้อมูลนี้มีความแตกต่างที่สังเกตเห็นได้ระหว่างสองคลาสดังใน Figure 3 กราฟ t-SNE จึงแยกแยะจุดข้อมูลของภาพที่อยู่ต่างคลาสได้ง่ายทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณเวกเตอร์แทนภาพและสร้างกราฟ t-SNE ไม่ได้

ใช้ข้อมูลลาเบล จึงเห็นได้ว่าเวกเตอร์แทนภาพนี้ช่วยให้การแยกแยะระหว่างภาพต่างคลาสนั้นทำได้ง่ายขึ้น

ในขณะที่ส่วนที่สอง เราแสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์แทนภาพเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและสามารถถ่ายทอดความรู้ไปใช้แก้ปัญหาอื่นที่คล้ายกันได้ โดยการนำโมเดล encoder ที่เทรนบนชุดข้อมูลป่าแอมะซอนมาใช้กับภาพในชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมันในการคำนวณเวกเตอร์แทนภาพ จากนั้นจึงเทรนโมเดล SVM ที่ใช้เวกเตอร์แทนภาพนี้สร้างลาเบลเทียมให้ข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมันที่ไม่มีลาเบล สุดท้ายจึงนำลาเบลเทียมไปเทรนโมเดล VGG16 ตามวิธีการของเรา

ใน Table 5 เราได้เปรียบเทียบโมเดล VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลจริง (VGG16) กับโมเดล Wrapper ที่เป็นเทคนิค SVM เทรนบนเวกเตอร์แทนภาพที่คำนวณด้วยโมเดล encoder ของชุดข้อมูลป่าแอมะซอน (Transferred

SVM) และโมเดล VGG16 ที่เทรนบนข้อมูลลาเบลเทียมที่ทำนายด้วยโมเดล Transferred SVM (Transferred VGG16) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลเวกเตอร์แทนภาพทั้งในรูปแบบโมเดล Wrapper (Transferred SVM) หรือใช้สร้างโมเดลจำแนกจากข้อมูลลาเบลเทียม (Transferred VGG16) ให้โมเดลที่มีประสิทธิภาพดีกว่าโมเดลที่ถูกเทรนบนลาเบลจริง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์แทนภาพที่คำนวณโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองมีคุณสมบัติหลายอย่างที่น่าประหลาดใจ ตั้งแต่การเข้ารหัสลักษณะของวัตถุในภาพซึ่งสามารถถ่ายทอดองค์ความรู้ไปใช้ในโจทย์ที่คล้ายกันได้ วิธีของเราใช้ประโยชน์จากหลักการนี้ร่วมกับวิธีการเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงบนชุดข้อมูลลาเบลขนาดเล็กได้

Table 5 Comparison between the models with transfer learning when 187 labeled data from palm oil plantation dataset are available.

Method	Acc.	P	R	F1
VGG16	65.2	.708	.647	.636
Transferred SVM	72.5	.692	.774	.731
Transferred VGG16	73.2	.716	.733	.725

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ เราได้นำเสนอกระบวนการสร้างข้อมูลลาเบลเทียมที่ช่วยให้สามารถสร้างโมเดลการเรียนรู้แบบมีผู้สอนที่มีประสิทธิภาพดี แม้ว่าจะมีปริมาณข้อมูลลาเบลน้อยและไม่เพียงพอต่อการสร้างโมเดลที่มีประสิทธิภาพได้ วิธีของเราใช้เทคนิคการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองร่วมกับเฟรมเวิร์กการเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอน เพื่อลดการพึ่งพาข้อมูลลาเบลปริมาณมากได้ การสร้างเวกเตอร์แทนภาพช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะของวัตถุในภาพโดยไม่ต้องมีข้อมูลลาเบล ในขณะที่การเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอนอย่างเทคนิค Wrapper จะเลือกใช้ข้อมูลบางส่วนของเวกเตอร์แทนภาพมาคำนวณเพื่อให้ได้โมเดลที่เหมาะสมกับโจทย์เป้าหมายที่สนใจ จึงเป็นการแสดงให้เห็นด้วยว่าวิธีการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองสามารถสร้างเวกเตอร์ที่แทนภาพที่สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้จากโจทย์หนึ่งไปยังโจทย์อื่นที่ใกล้เคียงได้ เราได้ทำการประเมินวิธีการของเราด้วยโจทย์การจำแนกภาพถ่ายดาวเทียมบนชุดข้อมูลสองชุด โดยวิธีการของเราให้ความแม่นยำ 75% บนชุดข้อมูลไร่ปาล์มน้ำมัน และ 86% บนชุดข้อมูลป่าแอมะซอน ซึ่งสูงกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างการเรียนรู้แบบมีผู้สอน อีกทั้งวิธีการของเราใช้ข้อมูลลาเบลน้อยกว่าถึง 9 เท่า สองชุดข้อมูลนี้มีปริมาณข้อมูลที่ต่างกันและมีวัตถุประสงค์ต่างกัน แต่งานวิจัยนี้ก็แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถให้องค์ความรู้จากโจทย์หนึ่งไปใช้

ในอีกโจทย์ได้ผ่านโมเดล encoder ที่ใช้คำนวณเวกเตอร์คุณลักษณะ

จากการศึกษายังพบว่าความแม่นยำของผลลัพธ์ยังสามารถพัฒนาเพิ่มได้อีก โดยในอนาคตหากใช้เทคนิคการเรียนรู้แทนภาพด้วยตนเองที่ซับซ้อนและทันสมัยกว่านี้ ก็จะสามารถสกัดคุณลักษณะสำคัญของภาพออกมาได้ดีกว่าเดิม และให้ลาเบลเทียมและผลลัพธ์ที่ดีขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ RDG61Q0020

เอกสารอ้างอิง

Benjamin Goldenberg, Burak Uz Kent, Christian Clough, Dennis Funke, Deven Desai, grischka, Jesus MartinezManso, Kat Scott, Meg Risdal, Mike Ryan, Pete, Rachel Holm, Ramesh Nair, Sean Herron, Tony Stafford, Wendy Kan. (2017). *Planet: Understanding the Amazon from Space*. Kaggle. <https://kaggle.com/competitions/planet-understanding-the-amazon-from-space>

- Chapelle, O., Schoellkopf, B., & Zien, A. (2006). *Semi-supervised learning (adaptive computation and machine learning)*. The MIT Press.
- Chen, T., Kornblith, S., Norouzi, M., & Hinton, G. (2020). *A simple framework for contrastive learning of visual representations*. arXiv preprint arXiv:2002.05709.
- Chen, T., Kornblith, S., Swersky, K., Norouzi, M., & Hinton, G. (2020). *Big self-supervised models are strong semi-supervised learners*. arXiv preprint arXiv:2006.10029.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Mach. Learn.*, 20(3), 273-297. doi: 10.1007/BF00994018
- Demir, I., Koperski, K., Lindenbaum, D., Pang, G., Huang, J., Basu, S., ... Raska, R. (2018). Deepglobe 2018: A challenge to parse the earth through satellite images. In *2018 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops (cvprw)* (pp. 172-17209). doi: 10.1109/CVPRW.2018.00031
- D.R., S., Shenoy, P. D., & R., V. K. (2017, Mar). Remote sensing satellite image processing techniques for image classification: A comprehensive survey. *IJCA*, 161(11), 24-37. doi: 10.5120/ijca2017913306
- Emily Liu, Judy Logan, kitushan, Meredith Lee, phoebeliuF8, QMirsharif, Sam Roy, Sherrie Wang, Valerie, Vani M, Varsha Venkatesh, WiDS Datathon. (2019). *WiDS Datathon 2019*. Kaggle. <https://kaggle.com/competitions/widsdatathon2019>
- Giorgiani do Nascimento, R., & Viana, F. (2020). Satellite image classification and segmentation with transfer learning. In *Aiaa scitech 2020 forum* (p. 1864). doi: 10.2514/6.2020-1864
- Hadsell, R., Chopra, S., & LeCun, Y. (2006). Dimensionality reduction by learning an invariant mapping. In *Cvpr* (Vol. 2, pp. 1735-1742). doi: 10.1109/CVPR.2006.100
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on cvpr* (pp. 770-778).
- Heupel, K., Spengler, D., & Itzerott, S. (2018). A progressive crop-type classification using multitemporal remote sensing data and phenological information. *PhG-J Photogramm Rem*, 86(2), 53-69. doi: 10.1007/s41064-018-0050-7
- Hinton, G., Vinyals, O., & Dean, J. (2015). *Distilling the knowledge in a neural network*. arXiv preprint arXiv:1503.02531.
- Jing, L., & Tian, Y. (2020). Self-supervised visual feature learning with deep neural networks: A survey. *IEEE TPAMI*, 1-1. doi: 10.1109/TPAMI.2020.2992393
- Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geosci Remote S*, 14(5), 778-782. doi: 10.1109/LGRS.2017.2681128
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., ... Fei-Fei, L. (2015). Imagenet large scale visual recognition challenge. *IJCV*, 115(3), 211-252. doi: 10.1007/s11263-015-0816-y
- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. arXiv preprint arXiv:1409.1556.
- van der Maaten, L., & Hinton, G. (2008). Visualizing data using t-sne. *Journal of machine learning research*, 9(Nov), 2579-2605.
- van Engelen, J., & Hoos, H. (2020, feb). A survey on semi-supervised learning. *Mach. Learn.*, 109(2), 373-440. doi: 10.1007/s10994-019-05855-6
- Zhu, X. (2005). *Semi-supervised learning literature survey* (Tech. Rep.). University of Wisconsin-Madison Department of Computer Sciences.

การออกแบบและจัดสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์จากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อม (*Mitragyna speciosa* Korth.)

Design and construction of automatic solar irrigation system based on soil moisture using PLC for kratom (*Mitragyna speciosa* Korth.)

องอาจ ทับบุรี* และ กัญยรัตน์ เอกเอี่ยม¹
Ong-art Tubburee^{1*} and Kanyarat Ek-iam¹

Received: 8 December 2023 ; Revised: 10 January 2024 ; Accepted: 19 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อมโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการศึกษารูปแบบของการให้น้ำและค่าความชื้นในดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชกระท่อมมาเป็นข้อมูลสำคัญในการให้น้ำ สำหรับระบบที่นำเสนอจะใช้วิธีการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับจ่ายให้มอเตอร์ปั้มน้ำและอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้พีแอลซีบอร์ดเป็นตัวประมวลผลจากข้อมูลที่ส่งมาจากเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและเซนเซอร์วัดความชื้นในดินสำหรับเริ่มต้นการให้น้ำพืชกระท่อม และใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความดันน้ำในท่อส่งน้ำเพื่อควบคุมโซลินอยด์วาล์วจำนวน 2 ตัว ให้เปิด/ปิดการจ่ายน้ำให้ได้ความแรงและปริมาณน้ำจากหัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์ที่เหมาะสมกับพืชกระท่อม ผลการทดสอบใช้งานจริงแสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบและจัดสร้างสามารถควบคุมการให้น้ำได้ดีมีรัศมีการกระจายน้ำจากหัวจ่ายน้ำอยู่ระหว่าง 28-60 เซนติเมตรทั้งในภาวะที่มีแสงอาทิตย์น้อยและแสงอาทิตย์มาก และยังสามารถให้น้ำแก่พืชกระท่อมจนความชื้นในดินบริเวณโคนต้นมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80% ตลอดฤดูกาล ทำให้ได้ใบของพืชกระท่อมที่สมบูรณ์ขึ้น คิดเป็นอัตราส่วนของจำนวนใบที่ลดลงต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมที่ดีขึ้นกว่าวิธีการให้น้ำแบบเดิมอยู่ระหว่างร้อยละ 5.04-9.87

คำสำคัญ: พืชกระท่อม, ความชื้นในดิน, มินิสปริงเกอร์, เซลล์แสงอาทิตย์, พีแอลซี

Abstract

This research aims to design and develop an automatic solar irrigation control system based on soil moisture using PLC for *Mitragyna speciosa*. The various types of irrigation techniques and suitable soil moisture for *Mitragyna speciosa*, which are important parameters for watering, are discussed in this paper. The proposed system uses calculation methods for solar power generation to produce electricity for water pumps and control devices. A PLC board was used to process the information received from a voltage sensor and a soil moisture sensor to initiate irrigation for *Mitragyna speciosa*. Additionally, information received from pressure sensors installed on the water pipe was used to process and control two solenoid valves to turn ON/OFF the water supply to achieve a high-velocity and high-volume spray by mini-sprinklers suitable for *Mitragyna speciosa*. The experimental results showed that the water distribution radius from the water dispenser ranged from 28 to 60 cm, both in low and high sun intensity conditions. Furthermore, the proposed automatic irrigation system could maintain a soil moisture content of 50-80% for *Mitragyna speciosa* throughout all seasons, resulting in a better fecund of *Mitragyna speciosa* leaves. The ratio of leaves lost per 1 kilogram of weight was better than the traditional irrigation method by 5.04-9.87%.

Keywords: *Mitragyna speciosa*, soil moisture, mini sprinkler, solar cell, PLC

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

¹ Assistant Professor, Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Tambon Klong Neung, Pathumthani 13180 Thailand

* Corresponding author: E-mail: ongart.tub@vru.ac.th, tubburee.o@gmail.com

บทนำ

ในอดีตสำหรับประเทศไทยพืชกระท่อม (*Kratom*) ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil. จัดเป็นยาเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 ตามความในพระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 มาตรา 7 เนื่องจากการรับประทานใบพืชกระท่อมมากเกินไปหรือติดต่อกันเป็นระยะเวลาานานจะเกิดอาการนอนไม่หลับหรือมีภาวะหลับยาก (สาวิตรี อัจฉนวงศ์กรชัย และคณะ, 2563) และยังทำให้เสพติดและเกิดผลเสียต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาทางการแพทย์พบว่า สารไมทราจาอินิน (*Mitragynine*) ในใบพืชกระท่อมมีสรรพคุณที่ช่วยบรรเทาอาการเจ็บปวดในส่วนต่างๆ ของร่างกาย มีผลต่อสมองและพฤติกรรม ทำให้ออยากกินอาหารและน้ำลดลง เป็นยาต้านซึมเศร้าที่ออกฤทธิ์ในสมองทำให้ผู้ป่วยรู้สึกดีขึ้น (นิราณี บือราเฮง และคณะ, 2565) นอกจากนี้ยังนำไปใช้บรรเทาอาการปวดแทนมอร์ฟีนได้ โดยมีความแรงต่ำกว่าประมาณ 10 เท่า และมีข้อดีกว่าหลายประการ จากประโยชน์ดังกล่าวทำให้พืชกระท่อมถูกถอดออกจากบัญชียาเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 ตามประกาศใช้พระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ (ฉบับที่ 8) พ.ศ. 2564 และในวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2565 ได้มีการประกาศในราชกิจจานุเบกษา โดยยกเลิกการกำหนดให้พืชกระท่อมเป็นบัญชียาเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 ตามพระราชบัญญัติพืชกระท่อม พ.ศ. 2565

จากการศึกษาตลาดของใบพืชกระท่อมพบว่ามีตลาดใหญ่ที่สุดอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท/ปี โดยส่วนใหญ่นำไปใช้เพื่อช่วยรักษาโรคซึมเศร้า บำบัดยาเสพติด เพิ่มสมรรถภาพทางเพศ ตลอดจนนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อวางจำหน่ายในรูปแบบต่างๆ มากมาย (ชมรมภาคีเครือข่ายเพื่อพัฒนาชุมชน, 2564) สำหรับประเทศไทยพบการปลูกพืชกระท่อมได้โดยทั่วไป แต่แหล่งที่พบมากจะอยู่ในป่าธรรมชาติของภาคใต้ อาทิ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ตรัง สตูล พัทลุง สงขลา ยะลา ปัตตานี นราธิวาส และบางจังหวัดของภาคกลาง เช่น ปทุมธานี (นิราณี บือราเฮง และคณะ, 2565) ซึ่งมีลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดเป็นที่ราบลุ่ม คิดเป็นร้อยละ 89.65 ของพื้นที่ทั้งหมด ดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวจัด และมีแหล่งน้ำธรรมชาติผิวดินจำนวนมาก (สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน, 2562) จึงเหมาะต่อการปลูกพืชกระท่อม เนื่องจากเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีน้ำมาตลอดทั้งปี รวมถึงดินที่มีความชื้นหรือดินเหนียว (บ้านและสวน, 2565) ทำให้เกษตรกรในจังหวัดปทุมธานีหันมาปลูกพืชกระท่อมกันเป็นจำนวนมาก จนประสบปัญหาการบำรุงและดูแลไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะเรื่องการให้น้ำอย่างสม่ำเสมอ ด้วยวิธีการเดิมคือ การใช้กระบวยตักรดน้ำหรือเกษตรกรบางรายได้ประยุกต์ใช้เรือสูบน้ำที่ใช้เครื่องยนต์ซึ่งต้องใช้แรงงานคนและใช้เวลาในการให้น้ำพืชกระท่อม

ค่อนข้างนานกว่าจะแล้วเสร็จ ทำให้เกษตรกรเกิดความเหนื่อยล้าจนไม่สามารถให้น้ำพืชกระท่อมได้เป็นประจำตามความต้องการของพืชกระท่อม ลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชกระท่อมให้เป็นไปอย่างล่าช้า และใบของพืชกระท่อมก็มีขนาดเล็กงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อราคาขาย

วิธีการให้น้ำพืชไร่และพืชสวนที่ใช้กันในปัจจุบันจำแนกได้ 4 วิธีการ ได้แก่ การปล่อยน้ำท่วมแปลง (Flood irrigation) การปล่อยน้ำไปตามร่องคู (Localized irrigation) การให้น้ำแบบหยด (Drip irrigation) และการให้น้ำแบบฝนเทียม (Sprinkler irrigation) (Uromu, *et al.*, 2019) โดยพบว่าการให้น้ำแบบหยดเป็นวิธีการที่ช่วยประหยัดน้ำได้มาก และยังใช้น้ำได้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการให้น้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 75-95 เพราะการติดตั้งหัวน้ำหยดบริเวณโคนต้นไม้จะทำให้น้ำเปียกชื้นเฉพาะบริเวณรากเท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อด้อยที่ส่งผลให้การให้น้ำลักษณะนี้ไม่ได้รับความนิยมนำไปใช้กับการทำเกษตรแปลงใหญ่ คือการใช้ถึงน้ำขนาดใหญ่เพื่อเก็บและจ่ายน้ำให้มีความดันคงที่ และการใช้ระบบกรองน้ำเพื่อกรองตะกอนที่อาจติดมากับน้ำออกก่อนที่จะส่งออกไปตามท่อต่างๆ โดยพบว่าเมื่อใช้งานไปแล้วมักเกิดปัญหาการอุดตันของหัวน้ำหยด สำหรับวิธีการให้น้ำแบบฝนเทียมหรือที่นิยมเรียกว่า แบบสปริงเกอร์ เป็นวิธีการให้น้ำเหนือดินโดยการฉีดน้ำเป็นฝอยคล้ายฝนให้ครอบคลุมเนื้อที่เป็นแห่งๆ ไป ถือเป็นวิธีการให้น้ำที่ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการทำเกษตรแปลงใหญ่ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพการให้น้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 60-90 (Mane, *et al.*, 2021)

จากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วในปัจจุบัน ส่งผลให้ระบบรดน้ำพืชอัตโนมัติได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นใช้งานเป็นจำนวนมาก (Hassan, *et al.*, 2019 ; Idama & Ekruyota, 2021) โดยสามารถควบคุมทั้งเวลาและปริมาณการให้น้ำพืชได้สอดคล้องตามความต้องการของพืช ส่งผลให้ได้ผลผลิตที่ดีมีคุณภาพ และสามารถใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการอำนวยความสะดวกให้เกษตรกรที่ไม่มีเวลาให้น้ำแก่พืช โดยเฉพาะกรณีเกษตรกรที่ทำเกษตรแปลงใหญ่ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซี (PLC, Programmable logic controller) สำหรับพืชกระท่อม ณ พื้นที่ไร่พืชกระท่อมของเกษตรกรในตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ดังแสดงภาพถ่ายพื้นที่จากดาวเทียมใน Figure 1(a) โดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนทางธรรมชาติ ถือเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษหรือส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังช่วยลดต้นทุนทางพลังงานให้เกษตรกรด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการให้น้ำและค่าความชื้นในดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชกระท่อมที่ปลูกในอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อม
3. เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ระบบการให้น้ำพืชกระท่อมแบบอัตโนมัติ
4. เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อมโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยด้วยการออกแบบและสร้างต้นแบบของระบบการควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับกระท่อมจำนวน 80 ต้น ที่ถูกแบ่ง

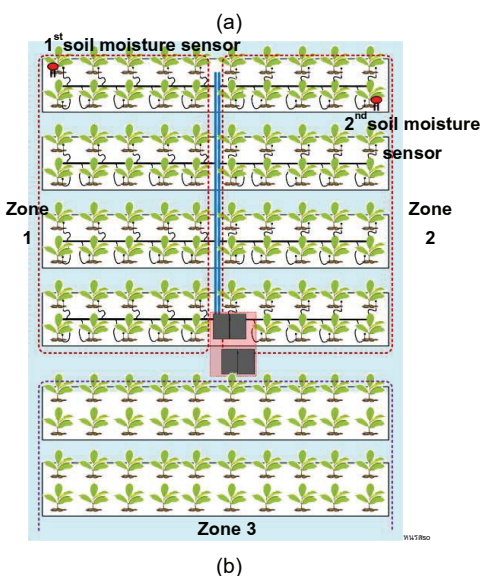


Figure 1 Design of automatic irrigation control system.

(a) Satellite Imagery of the proposed

Mitragyna speciosa field (b) Water distribution pipe plan

ออกเป็น 2 พื้นที่ๆ ละ 40 ต้น โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้อุปกรณ์ควบคุมการให้น้ำและมอเตอร์ปั้มน้ำ และเพื่อให้ความแรงและปริมาณน้ำจากหัวจ่ายน้ำมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอทั้ง 80 ต้น ผู้วิจัยจึงออกแบบการวางท่อส่งน้ำโดยเลือกใช้ท่อพีวีซี (PVC) ขนาด 2 นิ้ว จำนวน 8 ท่อ ต่อรับน้ำที่ออกมาจากมอเตอร์ปั้มน้ำเพื่อให้น้ำแก่พืชกระท่อมทั้ง 2 พื้นที่ และใช้ท่อพีอี (PE) ขนาด 20 มิลลิเมตร เป็นท่อจ่ายน้ำไปให้กับหัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์ (Mini sprinkler) ที่ติดตั้งอยู่บริเวณโคนต้นพืชกระท่อมแต่ละต้น ดังแสดงใน Figure 1(b)

1. การศึกษาวิธีการให้น้ำและค่าความชื้นในดินที่เหมาะสมกับพืชกระท่อม

1.1 การศึกษาวิธีการให้น้ำที่เหมาะสม

จากการศึกษาวิธีการให้น้ำแก่พืชไร่และพืชสวนพบว่าการให้น้ำแบบหยดบริเวณโคนต้นพืชจะทำให้เกิดความชุ่มชื้นเฉพาะบริเวณรากพืชเท่านั้น เป็นวิธีการให้น้ำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ก็มีข้อด้อยของการใช้ถึงน้ำขนาดใหญ่ และปัญหาการอุดตันของหัวน้ำหยด ขณะที่การให้น้ำแบบสปริงเกอร์เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมนำไปใช้กับการทำเกษตรแปลงใหญ่ แต่มีประสิทธิผลการให้น้ำต่ำกว่าวิธีการให้น้ำแบบหยด เพราะการฉีดน้ำเป็นฝอยคล้ายฝนจะทำให้น้ำระเหยและกระจายไปตามลมได้ง่าย (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2564) อีกทั้งการกระจายของน้ำอาจไกลเกินกว่าบริเวณรากพืช จากข้อโดดเด่นและข้อด้อยของการให้น้ำทั้ง 2 วิธีข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้วิธีการให้น้ำแบบสปริงเกอร์ในไร่พืชกระท่อม โดยการให้หัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์เพื่อให้น้ำเฉพาะบริเวณโคนต้นพืชกระท่อมแต่ละต้น และถึงแม้จะเป็นการให้น้ำเฉพาะบริเวณโคนต้น แต่ระยะการกระจายของน้ำจากหัวสปริงเกอร์อาจไกลเกินกว่าที่รากพืชกระท่อมจะดูดซึมมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังทำให้วัชพืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้จากการศึกษารศมีการกระจายน้ำเพื่อรักษาระดับความชื้นในดินบริเวณเขตรากพืชให้อยู่ในระดับที่รากพืชดูดซึมไปใช้ได้ง่าย และเป็นไปตามความต้องการของพืช พบว่าควรมีรัศมีอยู่ระหว่างร้อยละ 60-90 ของเขตรากพืช (บุญมา ป้านประดิษฐ์, 2546) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการวิจัยเชิงสำรวจจากไร่พืชกระท่อมของเกษตรกรในอำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี โดยการขุดและบันทึกความยาวรากฝอยของพืชกระท่อมที่มีอายุระหว่าง 2-3 ปี จำนวน 60 ต้น จากไร่พืชกระท่อม 8 แห่ง พบว่าความยาวรากฝอยที่วัดจากโคนต้นถึงปลายรากมีค่าอยู่ระหว่าง 45-67 เซนติเมตร จึงสรุปได้ว่ารัศมีการกระจายน้ำที่เหมาะสมกับความยาวรากฝอยที่น้อยที่สุดถึงมากที่สุดควรอยู่ระหว่าง 27.0-60.3 เซนติเมตร

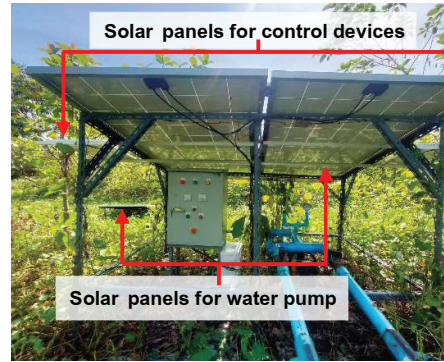
1.2 การศึกษาค่าความชื้นในดินที่เหมาะสม

การให้น้ำที่เหมาะสมแก่พืชควรเริ่มให้เมื่อความชื้นในดินมีค่าลดลงถึงจุดวิกฤต (Critical point) จนกระทั่งปริมาณน้ำมากพอที่จะเพิ่มความชื้นในดินให้ถึงความชื้นชลประทาน (Field capacity) โดยเรียกช่วงความชื้นดังกล่าวว่า ความชื้นในดินที่ยอมให้พืชดูดซึมน้ำไปใช้ได้ (Allowable depletion) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 50-75% (บุญมา บ้านประดิษฐ์, 2546) อย่างไรก็ตามการให้น้ำแก่พืชจนความชื้นในดินมีค่าสูงเกินไปอาจไม่เป็นผลดีกับพืช เพราะจะทำให้รากพืชขาดออกซิเจน อาจเกิดเกลือหรือต่างมาสะสมอยู่บริเวณรากพืชและผิวดิน ส่งผลให้โครงสร้างของดินสูญเสียแร่ธาตุ อีกทั้งยังเป็นการจำกัดระยะรากของพืช แต่สำหรับพืชกระท่อมนั้นจะเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีอินทรียสารสูงหรือดินเหนียวที่มีน้ำ และความชื้นในดินไม่ต่ำกว่า 80 % (นิราณี บือราเฮง และคณะ, 2565) ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า การได้รับแสงอาทิตย์อย่างเพียงพอ (แดดจัด) ตลอดทั้งวัน จะช่วยให้พืชกระท่อมยืดข้อกิ่ง ผลิใบได้ดีมีคุณภาพ และมีขนาดของใบตรงตามความต้องการ (บ้านและสวน, 2565 ; ศุภวัฒน์ กลุ่มวิเศษ, 2564) จากผลการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่าความชื้นในดินที่เหมาะสมที่ยอมให้พืชกระท่อมดูดซึมน้ำไปใช้ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80 % และการให้น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับดินในช่วงกลางวันสามารถทำได้และเหมาะสมกับพืชกระท่อม

2. การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดิน

2.1 ระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติ

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดิน แสดงดัง Figure 2 ผู้วิจัยเลือกใช้พีแอลซีบอร์ด (PLC board) รุ่น FX3U-24MR ซึ่งมีราคาต่ำกว่าพีแอลซีโดยทั่วไปที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่ก็ยังคงไว้ซึ่งความเที่ยงตรงสูงและทนทานต่อการทำงานในสภาพอากาศภายนอกได้ดี (อิทธิรงค์ ทองย้อย, 2565) ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลและควบคุมการทำงานของรีเลย์ (Relay) รุ่น MY2 ที่ต่ออนุกรมอยู่กับมอเตอร์ปั้มน้ำแบบหอยโข่ง โดยพีแอลซีบอร์ดจะรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensor) รุ่น VADT เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเริ่มต้นให้น้ำแก่พืชกระท่อม สำหรับการตรวจวัดค่าความชื้นในดิน เลือกใช้เซนเซอร์วัดความชื้นในดินรุ่น THC-S ที่ใช้หลักการวัดค่าความชื้นในดินจากการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานระหว่างหัววัดที่ทำจากแท่งเหล็กสแตนเลส ซึ่งมีความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ



(a)



(b)

Figure 2 Hardware implementation for solar-powered automatic irrigation system (a) Overall proposed system (b) Control unit

97-98 ผ่านสายสัญญาณความยาวสูงสุด 1,200 เมตร และเลือกใช้เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) แบบ Silicon pressure transmitter transducer ขนาด 0-10 บาร์ ซึ่งได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อวัดความดันลมและความดันน้ำ โดยการติดตั้งเซนเซอร์ดังกล่าวกับเข้ากับท่อส่งน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) รุ่น Brass screw 2/2 จำนวน 2 ตัว ให้เปิด/ปิดการจ่ายน้ำ เพื่อให้ได้ความแรงและปริมาณน้ำจากหัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์ที่เหมาะสมและสม่ำเสมอทั้งหมด 80 ต้น

2.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติ

แผนผังการออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงาน ของระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้น

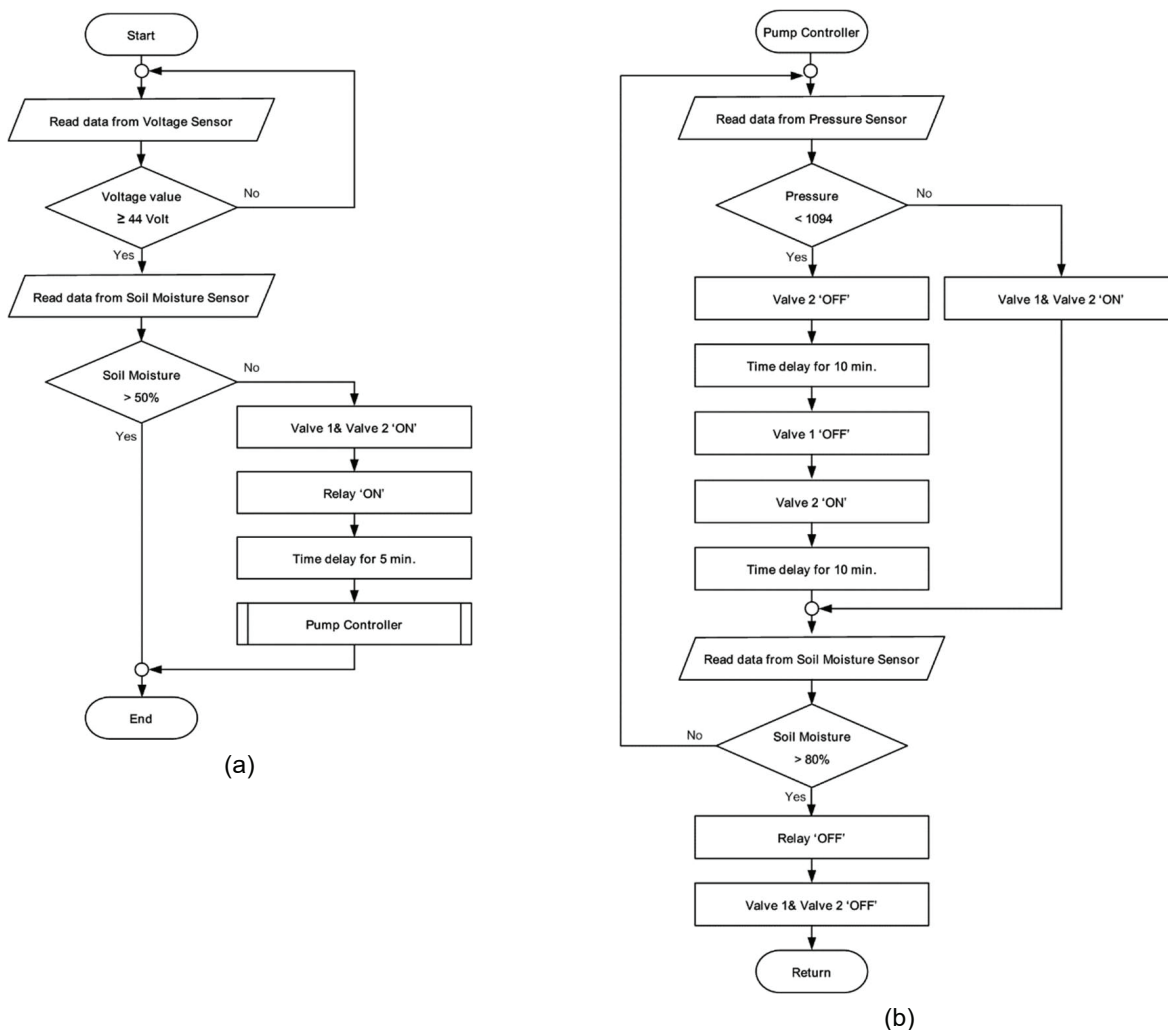


Figure 3 Programming flowchart of the proposed system. (a) Main program (b) Sub program

Table 1 Water distribution radius of the mini sprinkler were obtained by changing the DC voltage.

Voltage (V)	Measured power (W)	Water pressure (bar)	The lowest value of the measured water distribution radius. (cm)			
			1 st Testing	2 nd Testing	3 rd Testing	Average
40	278	0.45	20*	21*	20*	20.33
42	349	0.68	24*	22*	22*	22.67
44	402	0.76	27*	27*	28*	27.33
46	539	0.80	29*	30*	30*	29.67
48	687	0.84	29	27	27	27.67
50	702	0.94	31	30	31	30.67
52	766	0.97	34	34	33	33.67
54	796	0.98	36	36	35	35.67
56	815	1.10	40	38	38	38.67
58	845	1.26	42	43	41	42.00
60	878	1.34	45	44	45	44.67

* Use the pattern of irrigation by alternating the water supply valves in each zone.

ในดิน แสดงดัง Figure 3 เริ่มต้นด้วยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อตรวจสอบและแปลผลว่าปริมาณแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาดังกล่าวเพียงพอต่อการแปลงผันเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้มอเตอร์ปั้มน้ำหรือไม่ โดยการทดลองใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ปั้มน้ำแบบหอยโข่งขนาด 910 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 40-96 โวลต์ จากนั้นทำการปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งถึงค่าแรงดันที่ทำให้มอเตอร์ปั้มน้ำสามารถจ่ายน้ำจนกระทั่งมีการกระจายน้ำมีค่าไม่น้อยกว่าค่าต่ำสุดของระยะที่เหมาะสมพร้อมบันทึกผลที่ได้รับ ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นซึ่งหมายถึงปริมาณแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมากระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์ปั้มน้ำมีกำลังดูดและอัดน้ำ (Measured power) ไปให้พีชกระท่อมมากขึ้นจนทำให้รัศมีการกระจายน้ำมีค่าสูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามเพื่อให้สอดคล้องกับผลการศึกษาเรื่องรัศมีการกระจายน้ำที่เหมาะสม (บุญมา ป้านประดิษฐ์, 2546) สำหรับการให้น้ำเฉพาะจุดบริเวณโคนต้นพีชกระท่อม ทำให้ได้ข้อสรุปว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่า 44 โวลต์ขึ้นไปจะทำให้ระบบสามารถให้น้ำบริเวณโคนต้นพีชกระท่อม โดยมีรัศมีการกระจายน้ำไม่ต่ำกว่า 27.0 เซนติเมตร

ภายหลังจากการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบควบคุมจะตรวจสอบค่าความชื้นในดินจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน โดยหากความชื้นในดินมีค่าอยู่ระหว่าง 50-80 % ระบบควบคุมจะยังไม่สั่งให้น้ำพีชกระท่อม แต่หากความชื้นในดินลดลงต่ำกว่า 50 % ระบบควบคุมจะจ่ายไฟเลี้ยงให้ขดลวดสนามแม่เหล็กของรีเลย์ มีผลให้น้ำสัมผัสแบบปกติเปิด (Normally open) ของรีเลย์ที่ต่ออนุกรมอยู่กับมอเตอร์ปั้มน้ำต่อวงจร มอเตอร์ปั้มน้ำจะเริ่มทำงานพร้อมกับโซลินอยด์วาล์วทั้งสองตัวจะเปิดให้น้ำไหลผ่านท่อส่งน้ำ เพื่อน้ำที่พีชกระท่อมพร้อมกันทั้ง 2 พื้นที่เป็นเวลานาน 5 นาที จนน้ำที่ถูกสูบเข้าไปในท่อส่งน้ำและท่อจ่ายน้ำไหลเต็มทั้งระบบ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการให้น้ำด้วยโปรแกรมย่อย Pump Controller ดัง Figure 3(b) เริ่มต้นจากการตรวจสอบข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความดันที่ติดตั้งอยู่กับท่อส่งน้ำ โดยจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.84 บาร์ ซึ่งเป็นค่าความดันที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้ น้ำที่ฉีดออกจากหัวสปริงเกอร์ทั้ง 2 พื้นที่มีรัศมีการกระจายน้ำไม่ต่ำกว่า 27.0 เซนติเมตร ตามข้อมูล Table 1 แต่เนื่องจากเซนเซอร์วัดความดันที่เลือกใช้สามารถวัดความดันได้ในย่าน 0 ถึง 10 บาร์ และให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบอนาล็อกที่มีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ดังนั้นการเชื่อมต่อกับของสัญญาณอนาล็อกอินพุตของพีแอลซีบอร์ดที่มีความละเอียดขนาด 12 บิต จึงต้องคำนวณหาค่าความดันน้ำ (Actual press.)

ซึ่งมีหน่วยเป็นบาร์ (bar) ที่สัมพันธ์กับตัวเลขทางดิจิทัล (Digital press.) ซึ่งเกิดจากแปลงมาจากสัญญาณอนาล็อก ดังนี้

$$\text{Digital press.} = 819 + \left[3277 \times \frac{\text{Actual press.}}{10} \right] \quad (1)$$

จากสมการ (1) แทนค่าความดันน้ำที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ น้ำที่ฉีดออกจากหัวสปริงเกอร์ทั้ง 2 พื้นที่มีรัศมีการกระจายน้ำต่ำกว่า 27.0 เซนติเมตร ได้เท่ากับ 1094 โดยใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกรูปแบบการให้น้ำพีชกระท่อมว่าควรให้น้ำพร้อมกันทั้ง 2 พื้นที่หรือให้น้ำสลับกับครั้งละพื้นที่ และจะดำเนินการให้น้ำไปจนกว่าความชื้นในดินจะสูงขึ้นเท่ากับ 80% แล้วจึงจะกลับไปทำงานในโปรแกรมหลักเพื่อตรวจสอบปริมาณแสงอาทิตย์และความชื้นในดินสำหรับการให้น้ำในครั้งถัดไป

3. การออกแบบและจัดสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การดำเนินงานเพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ปั้มน้ำและอุปกรณ์ในระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซี จะใช้วิธีการออกแบบและสมการในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดอุปกรณ์ต่างๆ ตามรายละเอียดของเอกสารการถ่ายทอดและการเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และคู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559 ; กองถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี, ม.ป.ป.) ดังนี้

3.1 ประเมินความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า

ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของโหลด (E_a) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผลคูณระหว่างกำลังไฟฟ้าของโหลด (P_{load}) มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) และระยะเวลาที่เปิดใช้งาน (t_h) มีหน่วยเป็นชั่วโมง (h) ดังนี้

$$E_a = P_{load} \times t_h \quad (2)$$

จากสมการ (2) ผู้วิจัยได้คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบควบคุมการให้น้ำ โดยการหาผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (Current) ของอุปกรณ์แต่ละตัวที่วัดได้จากดิจิทัลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 115 และทดลองให้น้ำพีชกระท่อมด้วยหัวฉีดแบบมินิสปริงเกอร์ เพื่อให้ทราบระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นในดิน จำนวน 12 ครั้ง ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2565 จนถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2566 ข้อมูลแสดงดัง

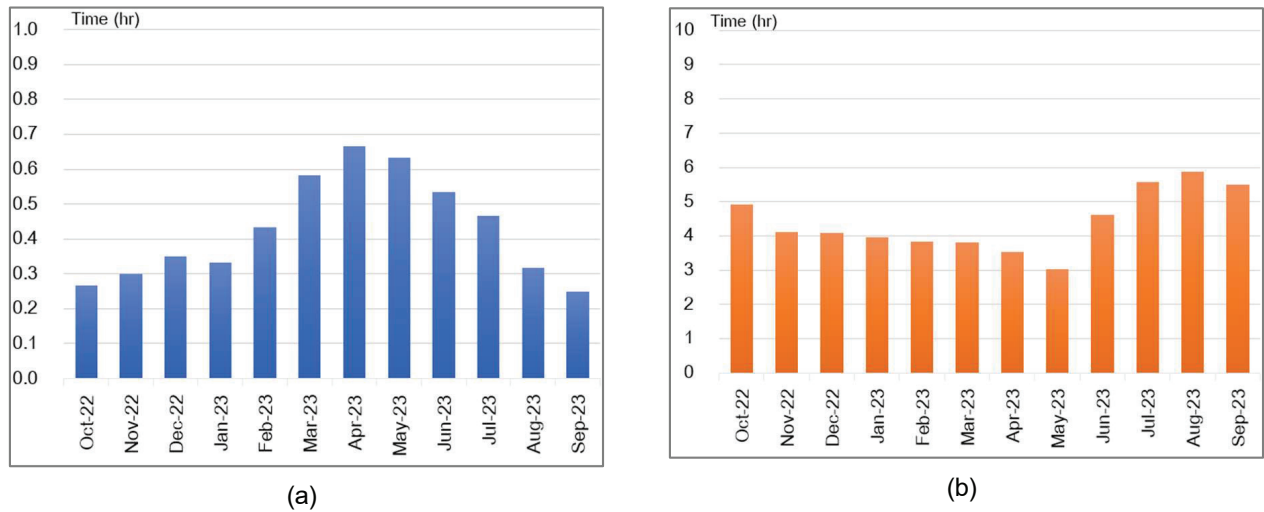


Figure 4 Soil moisture values of *Mitragyna speciosa* field versus time.

(a) Irrigation time for soil moisture increases to 80% (b) Time for soil moisture decreases to 50%.

Figure 4 พบว่า การให้น้ำจนความชื้นในดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 80% จะใช้เวลานานที่สุด 40 นาที ในเดือนเมษายน และภายหลังจากหยุดให้น้ำแล้ว พบว่าระยะเวลาที่ความชื้นในดินลดลงเหลือ 50% เร็วที่สุดเท่ากับ 3.02 ชั่วโมง โดยเกิดขึ้นในเดือนพฤษภาคม ดังนั้นหากคิดเฉพาะช่วงกลางวันซึ่งมี

แสงอาทิตย์จำนวน 8 ชั่วโมง อุปกรณ์ในระบบควบคุมที่เกี่ยวข้องกับการให้น้ำพืชกระท่อมจะต้องทำงานอย่างมาก 3 ครั้งต่อวัน โดยเป็นระยะเวลาครั้งละ 40 นาที ซึ่งสามารถคำนวณหาความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Energy consumption for control devices for the irrigation time period.

No.	Detail for control devices	Quantity (Piece)	Measured power (W)	Operate time (h)	Energy consumption (Wh)
1	PLC board (Model FX3U-24MR)	1	22.08	8.00	176.64
2	Brass solenoid valve (Model Brass Screw 2/2)	2	29.04	2.00	58.08
3	Voltage sensor (Model VADT)		Consume energy from the PLC board.		
4	Soil moisture sensor (Model THC-S)	2	0.15	8.00	1.20
5	Pressure sensor 0-10 bar to 4-20 mA	1	0.48	4.00	1.92
6	Relay (Model MY2)	1	1.12	4.00	4.48
Total					242.32

3.2 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์ควบคุมการให้น้ำ

อุปกรณ์ในระบบควบคุมการให้น้ำประกอบด้วยพีแอลซีบอร์ด เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า เซนเซอร์วัดค่าความชื้นในดิน เซนเซอร์วัดความดัน โซลีนอยด์วาล์ว และรีเลย์ ซึ่งจะใช้พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการ (3) โดยจะต้องมีขนาด (C_{Wh}) เพียงพอและเหมาะสมต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวัน (E_d) ที่ระบุไว้ใน Table 2

$$C_{Wh} = \frac{E_d}{P_d} \tag{3}$$

เมื่อ P_d คือ ค่าความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (Depth of discharge) ของแบตเตอรี่ ในกรณีนี้กำหนดไว้ร้อยละ 80 ของความจุเต็มพิกัด ซึ่งเป็นค่าแนะนำสำหรับแบตเตอรี่แบบจ่ายประจุสูง (Deep discharge) ทำให้ได้ขนาดแบตเตอรี่ 302.90 วัตต์-ชั่วโมง (Wh) แต่เนื่องจากผู้ผลิตกำหนดหน่วยของแบตเตอรี่ไว้เป็น แอมป์-ชั่วโมง (Ah) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$C_{Ah} = \frac{C_{Wh}}{V_{Batt}} \tag{4}$$

ในการวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมที่ใช้งานกับแรงดันไฟฟ้า (V_{Batt}) 24 โวลต์ ซึ่งเมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (4) พบว่าต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดไม่ต่ำกว่า 12.62 แอมป์-ชั่วโมง โดยผู้วิจัยเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 20 แอมป์-ชั่วโมง 12 โวลต์ จำนวน 2 ลูกมาต่อแบบอนุกรมกัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์

การหาขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ต้องทราบค่าความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (E_d) ที่ได้จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ารายวัน (E_u) ต่อสมรรถนะการแปลงผันกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (n_{system}) ดังสมการ

$$E_d = \frac{E_u}{n_{system}} \tag{5}$$

ในภาวะการใช้งานจริงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะต่ำกว่าปกติที่กำหนดไว้ โดยมีสาเหตุจากปัจจัยต่างๆ อาทิ อุณหภูมิที่สูงขึ้น ฝุ่นละอองและคราบสกปรกบนแผง และค่าความต้านทานของสายไฟส่งผลให้สมรรถนะการแปลงผันกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่เกิน 65% ทำให้ได้ค่าความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเท่ากับ 372.80 วัตต์-ชั่วโมง จากนั้นนำค่าความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวันหารด้วยจำนวนชั่วโมงที่มีแสงอาทิตย์สูงสุด (Peak sun hour, PSH) ที่สามารถชาร์จประจุให้กับแบตเตอรี่ได้จนเต็มในแต่ละวัน ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 5 ชั่วโมง ตามสมการ

$$E_{PV} = \frac{E_d}{PSH} \tag{6}$$

ทำให้ได้ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 74.56 วัตต์-ชั่วโมง โดยผู้วิจัยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) ขนาด 40 วัตต์สูงสุด (Wp) 18.1 โวลต์ จำนวน 2 แผงต่ออนุกรมกัน ดัง Figure 5(a) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าผ่านตัวควบคุมการชาร์จประจุ (Solar charger) ไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่

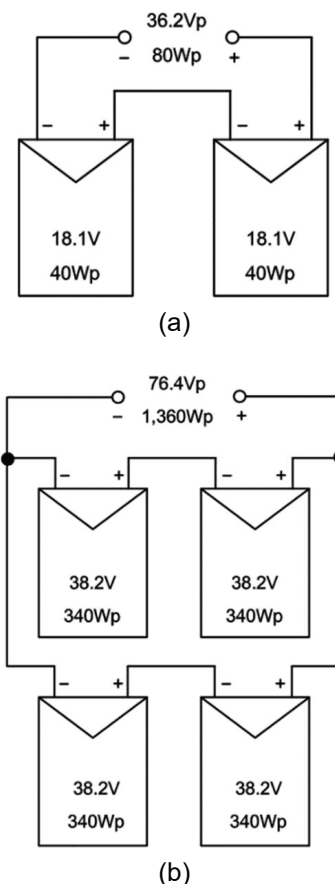


Figure 5 Schematic for solar panels (a) Feeding to control devices (b) Feeding to a water pump

3.3 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับมอเตอร์ปั้มน้ำ

การออกแบบและสร้างระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยตรงให้กับมอเตอร์ปั้มน้ำแบบหอยโข่ง ขนาด 910 วัตต์ ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่าง 40 ถึง 96 โวลต์ เริ่มต้นจากการคำนวณหาความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (E_d) โดยใช้สมการ (5) ซึ่งจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ปั้มน้ำที่ต้องใช้รายวัน (E_u) เพื่อให้ปั้มน้ำทำงานวันละ 3 ครั้ง และเป็นระยะเวลานานครั้งละ 40 นาที (กรณีให้น้ำพร้อมกันทั้ง 2 พื้นที่) หรืออาจเป็นระยะเวลานาน 80 นาที (กรณีให้น้ำสลับกันทีละพื้นที่) ทำให้ได้ค่าความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเท่ากับ 3,640 วัตต์-ชั่วโมง จากนั้นนำค่าความต้องการพลังงานแสงอาทิตย์รายวันที่ได้หารด้วยจำนวนชั่วโมงที่มีแสงอาทิตย์สูงสุดในแต่ละวันจำนวน 5 ชั่วโมง ตามสมการ (6) ทำให้ได้ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทำหน้าที่ย่อยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ปั้มน้ำ ขนาดไม่ต่ำกว่า 728 วัตต์-ชั่วโมง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 340 วัตต์สูงสุด 38.2 โวลต์ จำนวน 4 แผง มาต่อรวมกันดัง Figure 5(b)

ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อมโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อทดสอบใช้งานจริงในพื้นที่ไร่พืชกระท่อมของเกษตรกรตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี จำนวน 80 ไร่ มีรายละเอียดดังนี้

1. การทดสอบระบบควบคุมรัศมีการกระจายน้ำจากความชื้นในท่อส่งน้ำ

การทดสอบระบบควบคุมรัศมีการกระจายน้ำของหัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์บนฐานการวัดแรงดันไฟฟ้าและความดันในท่อส่งน้ำ โดยการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ปั๊มน้ำ (Measured power) ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) ยี่ห้อ Metrix รุ่น PX110 และความดันน้ำในท่อส่งน้ำที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันร่วมกับเกจวัดความดันที่ติดตั้งอยู่

กับท่อส่งน้ำ พร้อมทั้งวัดระยะของรัศมีการกระจายน้ำบริเวณโคนต้นพืชกระท่อมทั้ง 80 ไร่ จำนวน 6 วันครอบคลุมระยะเวลาตลอด 1 ปี เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2566 ดังแสดงข้อมูลใน Table 3

จาก Table 3 แสดงให้เห็นว่า ระบบการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถควบคุมรูปแบบการให้น้ำพืชกระท่อมที่รัศมีการกระจายน้ำบริเวณโคนต้นอยู่ระหว่าง 28-60 เซนติเมตร สอดคล้องกับการออกแบบสร้างตามแนวทางการศึกษาระยะของการให้น้ำบริเวณเขตรากพืช (บุญมา ป้านประดิษฐ์, 2546) และระบบจะให้น้ำพืชกระท่อม วันละ 2-3 ครั้ง โดยจำนวนครั้งของการให้น้ำจะมากขึ้นในฤดูร้อน แต่จะลดลงในช่วงฤดูฝน ทั้งนี้จากข้อมูลจะพบว่า ระบบจะเริ่มทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่า 44 โวลต์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้มอเตอร์ปั๊มน้ำ มีกำลังไฟฟ้าเพื่อการดูดและอัดน้ำมากขึ้น ทำให้ความดันน้ำในท่อส่งน้ำมีค่ามากขึ้น จนรัศมีการกระจายน้ำ

Table 3 The test results of the irrigation control system that affects the water distribution radius for 6 days.

Voltage (V)	Measured power (W)	Water Pressure (bar)	Operating of 2 solenoid valves		Water distribution radius (cm)	
			Alternate	Synchronous	Minimum	Maximum
12 November 2022						
47	466	0.82	✓		30	44
58	839	1.14		✓	39	51
69	894	1.46		✓	45	56
10 January 2023						
49	683	0.86		✓	29	48
71	901	1.58		✓	50	60
45	416	0.81	✓		28	45
24 March 2023						
50	704	0.93		✓	29	48
73	902.8	1.57		✓	51	60
66	851	1.40		✓	43	54
17 May 2023						
54	736	0.97		✓	33	50
70	896	1.49		✓	49	57
68	862	1.45		✓	45	56
8 July 2023						
71	901	1.53		✓	50	57
66	852	1.47		✓	42	58
14 September 2023						
47	458	0.81	✓		28	43
72	904	1.55		✓	51	58

มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 60 เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามการให้น้ำในช่วงเช้าและช่วงเย็นของแต่ละวันซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผีเสื้ออาศัยน้อย ระบบการให้น้ำก็ยังสามารถให้น้ำพืชกระท่อมได้โดยมีรัศมีการกระจายน้ำน้อยที่สุด 28 เซนติเมตร ด้วยการควบคุมการเปิด/ปิด โซลินอยด์วาล์วเพื่อให้น้ำแบบสลับกันทีละพื้นที่

2. การบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดิน

การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินซึ่งเป็นผลมาจากระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติที่นำเสนอ โดยการเก็บข้อมูลระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินบริเวณโคนต้นพืชกระท่อมที่ได้รับการให้น้ำจากระบบที่นำเสนอ ด้วยการสุ่มเก็บข้อมูลจำนวน 6 วัน ในทุก ๆ 30 นาที เริ่มตั้งแต่เวลา 07.00 น. ถึง 17.59 น. ครอบคลุมทั้ง 3 ฤดูกาลตลอดปี ได้แก่ ฤดูหนาวในวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 และวันที่ 10 มกราคม

พ.ศ. 2566 ฤดูร้อนในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2566 และวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 และฤดูฝนในวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2566 และวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2566 ดัง Figure 6

จาก Figure 6 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินตั้งแต่เวลา 07.00-17.59 น. มีค่าอยู่ระหว่าง 50-80% ตามที่ได้ศึกษาและออกแบบไว้ (นิราณี ปือราเฮง และคณะ, 2565 ; บุญมา ป้านประดิษฐ์, 2546) และจากระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินแต่ละฤดูกาลพบว่า ค่าความชื้นในดินจะลดลงจาก 80% จนถึง 50% ด้วยเวลาเร็วที่สุดในฤดูร้อนซึ่งเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2566 และวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 โดยคิดเป็นเวลาเฉลี่ย 3.60 ชั่วโมง และค่าความชื้นในดินจะเปลี่ยนแปลงด้วยระยะเวลานานที่สุดในฤดูฝน ซึ่งเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2566 และวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2566

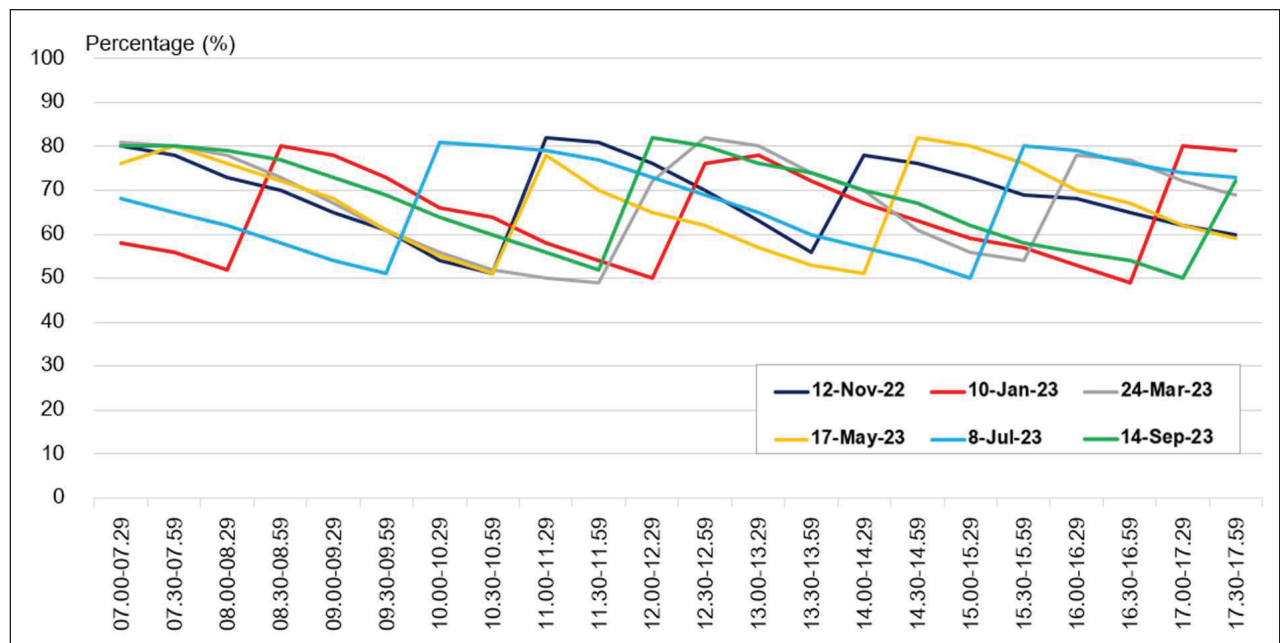


Figure 6 Results of soil moisture at the base of *Mitragyna speciosa* for 6 days obtained from the proposed automatic irrigation system.

Table 4 Results of *Mitragyna speciosa* leaves were harvested from the proposed area.

No.	Day/Month/Year for harvested	Number of leaves obtained by proposed system (leaves/kg)	Number of leaves obtained by traditional irrigation (leaves/kg)	Percentage of reduced leaves/kg (%)
1	21 January 2023	542	589	7.98
2	19 February 2023	544	592	8.11
3	12 March 2023	556	613	9.30
4	7 May 2023	548	608	9.87
5	15 July 2023	528	556	5.04
6	10 September 2023	519	548	5.29

คิดเป็นค่าเฉลี่ย 4.83 ชั่วโมง โดยมีสาเหตุมาจากดินที่ชุ่มชื้นด้วยน้ำฝนที่ตกตามฤดูกาลเป็นทุนเดิม สอดคล้องกับผลการศึกษาของประดิษฐ์ ตรีพัฒนาสุวรรณ ที่ได้ศึกษาความชื้นในดินในป่าธรรมชาติของศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพาน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ (ประดิษฐ์ ตรีพัฒนาสุวรรณ, 2540) ซึ่งพบว่า ปริมาณความชื้นในดินจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเดือน โดยที่ความชื้นจะค่อยๆ ลดลงในฤดูแล้ง แต่จะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูฝน

3. ผลผลิตจากการใช้ระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติที่นำเสนอ

ผู้วิจัยได้นัดหมายกับเกษตรกรเจ้าของไร่พืชกระท่อมที่ได้ทดลองใช้ระบบควบคุมการให้น้ำที่นำเสนอ ในวันที่มีการเก็บใบของพืชกระท่อมเพื่อส่งจำหน่าย จำนวน 6 วัน ครอบคลุมทั้ง 3 ฤดูกาลในปี พ.ศ. 2566 โดยการแยกใบที่เก็บได้จากพืชกระท่อมซึ่งปลูกในพื้นที่ที่ให้น้ำด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ ได้แก่ พื้นที่ 1 และพื้นที่ 2 ของ Figure 1(b) กับใบของพืชกระท่อมที่ปลูกในพื้นที่ 3 ของภาพดังกล่าว ที่ใช้รูปแบบการให้น้ำด้วยวิธีการเดิม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันตามอัตราส่วนของจำนวนใบต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ดังข้อมูลใน Table 4 พบว่า ใบของพืชกระท่อมที่เก็บมาจากพืชกระท่อมที่ปลูกอยู่ในพื้นที่ที่ได้รับการให้น้ำด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอทั้ง 6 วัน มีผลผลิตซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของจำนวนใบต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมอยู่ระหว่าง 519-556 ใบ ซึ่งถือเป็นผลผลิตที่ดีและมีคุณภาพ ตามรายงานผลการศึกษาของศุภวัฒน์ กล่อมวิเศษ ซึ่งพบว่า การให้น้ำอย่างสม่ำเสมอจะส่งผลให้พืชกระท่อมยืดชอกกิ่ง ผลใบโตดีมีคุณภาพ และขนาดใบตรงตามความต้องการ โดยมีอัตราส่วนของจำนวนใบต่อน้ำหนักอยู่ระหว่าง 500-600 ใบ/กิโลกรัม (ศุภวัฒน์ กล่อมวิเศษ, 2564) ทั้งนี้หากเปรียบเทียบใบของพืชกระท่อมที่เก็บได้จากพื้นที่ที่ได้รับการให้น้ำด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ กับใบของพืชกระท่อมในพื้นที่ที่ให้น้ำด้วยวิธีการเดิมปรากฏว่ามีผลผลิตซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของจำนวนใบที่ลดลงต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมดีขึ้นกว่าวิธีการให้น้ำแบบเดิม โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 5.04-9.87% และหากพิจารณาตามช่วงฤดูกาลจะพบว่า อัตราส่วนของจำนวนใบที่ลดลงต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมที่ได้จากพื้นที่ที่ใช้ระบบให้น้ำที่นำเสนอจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูร้อน ซึ่งอยู่ระหว่าง 9.30-9.87% และจะลดลงในช่วงฤดูฝน ซึ่งอยู่ระหว่าง 5.04-5.29% สาเหตุเนื่องจากฝนที่ตกลงมาให้ความชุ่มชื้นแก่ดิน ทำให้ดินบริเวณโคนต้นพืชกระท่อมทั่วทั้งไร่มีความชื้นสูงอย่างต่อเนื่องเกือบตลอดทั้งวัน

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินด้วยพีแอลซีสำหรับพืชกระท่อม ณ ไร่พืชกระท่อมของเกษตรกร

ในตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1,360 วัตต์สูงสุด 76.4 โวลต์ เพื่อจ่ายให้มอเตอร์ปั๊มน้ำแบบหยดโขง ขนาด 910 วัตต์ แรงดัน 40-96 โวลต์ สูบน้ำส่งไปตามท่อพีวีซีและท่อพีอี จนถึงหัวจ่ายน้ำแบบมินิสปริงเกอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณโคนต้นพืชกระท่อมจำนวน 80 ต้น และได้ออกแบบใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์สูงสุด 18.1 โวลต์ จำนวน 2 แผง ต่ออนุกรมกัน เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่ขนาด 20 แอมป์-ชั่วโมง 24 โวลต์ จ่ายให้อุปกรณ์ในระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดิน โดยมีพีแอลซีบอร์ดทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผล จากการรับข้อมูลผ่านเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและเซนเซอร์วัดความชื้นในดินมาเป็นเงื่อนไขการเริ่มต้นการให้น้ำพืชกระท่อม และใช้ความดันน้ำจากเซนเซอร์วัดความดันเป็นข้อมูลในการควบคุมโซลินอยด์วาล์วจำนวน 2 ตัว ให้เปิด/ปิดการจ่ายน้ำให้ได้อย่างเหมาะสมและปริมาณน้ำจากหัวจ่ายน้ำที่เหมาะสมกับพืชกระท่อม

ผลการทดสอบใช้งานตลอดระยะเวลา 1 ปี แสดงให้เห็นว่า แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาดเพียงพอสำหรับอุปกรณ์ในระบบควบคุมการให้น้ำแบบอัตโนมัติ และระบบที่นำเสนอสามารถควบคุมรูปแบบการให้น้ำด้วยวิธีมีการกระจายน้ำระหว่าง 28-60 เซนติเมตร ทั้งในภาวะที่มีแสงอาทิตย์น้อยและแสงอาทิตย์มาก อีกทั้งยังสามารถให้น้ำพืชกระท่อมได้จนค่าความชื้นในดินบริเวณโคนต้นอยู่ระหว่าง 50-80% ทุกฤดูกาล ทำให้ได้ใบของพืชกระท่อมที่มีน้ำหนักดีขึ้น คิดเป็นอัตราส่วนของจำนวนใบที่ลดลงต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัมที่ดีขึ้นกว่าวิธีการให้น้ำแบบเดิมอยู่ระหว่าง 5.04-9.87%

ข้อเสนอแนะ

การนำผลการวิจัยนี้ไปปรับใช้หรือต่อยอดเชิงพาณิชย์ จำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. ความชื้นในดินที่เหมาะสมกับพืชชนิดต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกันไป จึงควรศึกษาข้อมูลความต้องการของพืชชนิดนั้นๆ และดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าความชื้นในดินเพื่อการเริ่มต้นให้น้ำกับพืชชนิดนั้นๆ ในโปรแกรมควบคุมการทำงานให้ถูกต้อง
2. การเลือกใช้วัสดุ-อุปกรณ์ในการส่ง/จ่ายน้ำไปให้แก่พืชที่มีขนาดและความยาวแตกต่างกันออกไป จะส่งผลต่อความดันน้ำในท่อส่งน้ำ ซึ่งจะทำให้รั่วมีการกระจายน้ำจากหัวจ่ายน้ำมีความแตกต่างจากค่าอ้างอิงในงานวิจัยนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ใน

พระบรมราชูปถัมภ์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับวัสดุ-อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณเกษตรกรผู้ปลูกพืชกระท่อมในพื้นที่ตำบลระแหง อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี ที่อนุเคราะห์ให้ผู้วิจัยลงพื้นที่ศึกษาข้อมูลการปลูก การดูแล และการเก็บใบของพืชกระท่อม ตลอดจนการติดตั้งและทดลองใช้ระบบการให้น้ำแบบอัตโนมัติจากค่าความชื้นในดินในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). *คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์ (ส่วนทฤษฎี)*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2564). *ระบบการให้น้ำพืชแบบอัจฉริยะ*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี.
- กองถ่ายถอดและเผยแพร่เทคโนโลยี. (ม.ป.ป.). *การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์: การถ่ายถอดและการเผยแพร่การใช้พลังงานแสงอาทิตย์*. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- ชมรมภาคีเครือข่ายเพื่อพัฒนาชุมชน. (2564). *คู่มือการปลูกพืชกระท่อม*. <https://xn--2c8b4afb5dta0nmbe.com/manual/>
- นิราณี บือราเฮง, อีสริยาภรณ์ คำรงค์, สมทบ เวทโอสถ และอับดุลรอฮิม เปาะอีเต. (2565). รายงานการวิจัยเรื่องพัฒนาต้นแบบการปลูกกระท่อมภายใต้โรงเรือนอัจฉริยะที่เหมาะสมกับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน. ยะลา: มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- บ้านและสวน. (2565). *การเจาะลึกเรื่องราวของกระท่อม*. <https://www.baanlaesuan.com/256350/plant-scoop/kratom>
- บุญมา ปานประดิษฐ์. (2546). *หลักการชลประทาน*. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ประดิษฐ์ ตรีพัฒนสุวรรณ. (2540). รายงานผลการศึกษาเรื่องความชื้นในดินในป่าธรรมชาติของศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริบริเวณลุ่มน้ำห้วยไร่ อำเภอเมืองจังหวัดสกลนคร. ส่วนวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้.
- สวาทิตรี อัมณางค์กรชัย, อาภา ศิริวงศ์ ณ อยุธยา, ไพศาล ลิ้มสถิต, นิวัติ แก้วประดับ, สมสมร ชิตตระกูล, จุไรทิพย์ หวังสินทวีกุล, เอกสิทธิ์ กุมารสิทธิ์, สมชาย ศรีวิริยะจันทร์, ดาร์เนี่ย เจ๊ะหะ, วัชรพงศ์ พุ่มชื่น และดาริกา ไสงาม. (2563). *บทสรุปของพืชกระท่อม*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). สงขลา: ศูนย์ศึกษาปัญหาการเสพติด หน่วยงานระดับวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน. (2562). *รายงานแผนแม่บทการพัฒนาลุ่มน้ำระดับจังหวัดปทุมธานี*. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทาน.
- ศุภวัฒน์ กล่อมพิเศษ. (2564). *ประสบการณ์เกี่ยวกับพืชกระท่อมในตำบลน้ำพุ อำเภอบ้านนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี*. สงขลา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อิทธิรงค์ ทองย้อย. (2565). *การใช้ PLC FX3U Board + esp32 เปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้า 10 อุปกรณ์ ตอนที่ 1*. <https://eleceasy.com/t/plc-fx-3u-board-esp32-10-1/5101>
- Hassan, A., Shah, W.M., Harum N., Bahaman, N., & Mansourkiaie F. (2019). The development of an automated irrigation system using an open source microcontroller. *International Journal of Human and Technology Interaction*, 3(1), 101-107.
- Idama, O. & Ekruyota, O.G. (2021). Design and development of an automated irrigation system using internet services. *Saudi J Eng Technol*, 6(5), 84-88.
- Mane, S. S., Mane, M. S., & Kadam, U. S. (2021). Performance Evaluation of Automatic Irrigation System under Three Different Depths of Placement of Sensor. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(7), 170-181.
- Uroromu, I., Mohamed, C., Ejofodomi, O.A., & Godswill, O. (2019). Automation of irrigation systems and design of automated irrigation systems. *International Journal Water Resources Management and Irrigation Engineering Research*, 2(1), 11-27.

การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน

Depletion of solar radiation due to particulate matter with diameter of less than 2.5 micron

สุมามาลย์ บรרתิง^{1*}, สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย¹, เสริม จันทร์ฉาย¹, และ Sheng-Hsiang Wang²
Sumaman Buntoung¹, Somjet Pattarapanitchai¹, Serm Janjai¹, and Sheng-Hsiang Wang²

Received: 13 September 2023 ; Revised: 20 November 2023 ; Accepted: 13 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm ที่มีต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกภายใต้สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย (13.82° N, 100.04° E) ในการศึกษา ผู้วิจัยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm จากเครื่องวัดมลพิษทางอากาศต้นทุนต่ำ (AEROBOX) ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากการวัดด้วยเครื่องไพราโนมิเตอร์ และข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าเพื่อใช้จำแนกสภาพท้องฟ้า จากผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครปฐมมีค่าอยู่ในช่วง 5-160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าสูงสุดประมาณ 850 W/m^2 ในเดือนมีนาคม นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm ที่เพิ่มขึ้น 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีแนวโน้มทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงได้สูงถึง 0.58%

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน, รังสีอาทิตย์, มลพิษทางอากาศ, ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

Abstract

The aim of this research was to investigate the depletion of solar radiation at the Earth's surface due to particulate matter being smaller than 2.5 μm (PM2.5) under clear sky conditions at a solar monitoring site in Nakhon Pathom province, Thailand (13.82° N, 100.04° E). In this research, PM2.5 was obtained from a low-cost air pollution sensor (AEROBOX), solar radiation was measured by a pyranometer, and cloud cover data was retrieved from a sky camera used in order to classify sky conditions. From the analysis results, monthly average hourly PM2.5 at the site varied between 5 and 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and the maximum of monthly average hourly solar radiation was 850 W/m^2 in March. Additionally, the increasing of 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2.5 can influence the reduction of solar radiation by up to 0.58%.

Keywords: particulate matter smaller than 2.5 micron, solar radiation, air pollution, clear sky

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 +66 34 270 761 Email buntoung_s@silpakorn.edu

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000 +66 34 270 761 Email buntoung_s@silpakorn.edu

² Department of Atmospheric Sciences, National Central University, Taoyuan, 32001, Taiwan

* Corresponding author: Sumaman Buntoung Email buntoung_s@silpakorn.edu

บทนำ

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) ถือเป็นแหล่งพลังงานหลักของระบบบรรยากาศและโลกและเป็นตัวขับเคลื่อนการไหลเวียนของอากาศ ดังนั้นรังสีอาทิตย์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยจะส่งผลกระทบต่อภูมิอากาศ วัฏจักรของน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืช และการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น (Janjai, 2010; Kambezidis, 2021) ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกจะส่งผลกระทบต่อระบบดังกล่าวด้วยเช่นกัน ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ได้แก่ เมฆ ฝุ่นละออง โอโซน ไออน้ำ ตำแหน่งที่ตั้ง และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Janjai *et al*, 2009)

ปัจจุบันปัญหาฝุ่นละอองในบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในหลายพื้นที่ (Southerland *et al*, 2022; Munyaneza *et al*, 2022) โดยมีนักวิจัยบางส่วนทำการศึกษาระดับฝุ่นละอองในบรรยากาศ รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่นละอองในบรรยากาศและรังสีอาทิตย์ เช่น ในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนซึ่งเป็นประเทศที่มีความหนาแน่นของฝุ่นละอองสูง นักวิจัยส่วนใหญ่ (Qian *et al*, 2007; Luo *et al*, 2019; Zhou *et al*, 2023) จึงให้ความสนใจในประเด็นดังกล่าวจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศมีผลต่อการลดลงของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพบว่าฝุ่นละอองมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Narkwatchara *et al*, 2020; นิพนธ์ เกตุจ้อย & มรุตพงศ์ กอนอยู่, 2555)

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่เกิดวิกฤติฝุ่นละอองเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคกลาง (Amnuaylojaroen *et al*, 2022; Peng-in *et al*, 2022) โดยภาคกลางจะมีปริมาณฝุ่นละอองสูงในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ส่วนภาคเหนือมีค่าสูงในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ (Ahmad *et al*, 2022)

โดยทั่วไปการบอกความสามารถในการลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองจะบอกในรูปของความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth) ซึ่งรวมฝุ่นละอองทั้งหมดในคอลัมน์ของบรรยากาศที่รังสีอาทิตย์เคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มาถึงพื้นผิวโลก อย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน $2.5 \mu\text{m}$ ที่มีต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกเป็นสิ่งที่น่าสนใจและมีประโยชน์เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศส่วนใหญ่จะสะสมตัวอยู่บริเวณใกล้พื้นผิวโลก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝุ่นละอองบริเวณใกล้พื้นผิว

โลกย่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ด้วยเช่นกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน $2.5 \mu\text{m}$ ที่มีต่อรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยยังคงมีจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน $2.5 \mu\text{m}$ และความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก โดยใช้ข้อมูลจากการวัดภาคพื้นดินที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์จังหวัดนครปฐม

วิธีการวิจัย

1. สถานที่และข้อมูลที่ใช้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝุ่นละอองและความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.82° N , 100.04° E) (Figure 1) ซึ่งอยู่ในพื้นที่ภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย



Figure 1 The location of the solar monitoring site at Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom Province

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน $2.5 \mu\text{m}$ ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ และข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า โดยข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน $2.5 \mu\text{m}$ ได้จากเครื่องวัดคุณภาพ

อากาศแบบต้นทุนต่ำ รุ่น AEROBOX ของ Department of Atmospheric Sciences, National Central University ไต้หวัน (Figure 2) ซึ่งเครื่องวัดดังกล่าวจะทำการวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm โดยใช้เซนเซอร์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง ทำการวัดปริมาณฝุ่นละอองทุก ๆ 1 s และบันทึกค่าเฉลี่ยทุก ๆ 1 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง ข้อมูลดังกล่าวสามารถดาวน์โหลดได้จาก <https://ideasky.app/> ส่วนข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 (Figure 3) ซึ่งวัดความเข้มข้นของก๊าซในช่วงความยาวคลื่น 0.3-3.0 μm เครื่องไพราโนมิเตอร์ดังกล่าวเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล รุ่น DX2000 (Yokogawa) โดยจะให้ข้อมูลออกมาเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าทุก ๆ 1 s ระหว่างเวลา 5:00-18:00 น. ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าดังกล่าวสามารถแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซได้โดยอาศัยค่าการตอบสนองของเครื่องวัด (sensitivity) เครื่องวัดนี้ได้รับการสอบเทียบมาตรฐานทุกปี ตามมาตรฐาน ISO9847 สำหรับข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าได้จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า รุ่น ASI-16 ของบริษัท EKO (Figure 4) ซึ่งจะทำการบันทึกภาพถ่ายท้องฟ้าทุก ๆ 5 นาที ระหว่าง 6:00-18:00 น. จากนั้นประมวลผลภาพให้เป็นข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า โดยข้อมูลปริมาณเมฆนี้จะใช้สำหรับคัดเลือกวันและเวลาที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซ และข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า ในระหว่างวันที่ 15 พฤศจิกายน ค.ศ. 2022-31 สิงหาคม ค.ศ. 2023

นอกจากนี้ผู้วิจัยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm ที่ได้จากเครื่องวัดฝุ่นละอองรุ่น ADR1500 (Thermo Scientific™) ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่เก็บตัวอย่างอากาศเข้ามาผ่านแผ่นกรองเพื่อคัดแยกขนาดของอนุภาคและใช้หลักการกระเจิงแสงที่ความยาวคลื่น 880 nm เพื่อหาความเข้มข้นของอนุภาค เครื่องวัดดังกล่าวติดตั้งไว้ที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์ คณะวิทยาศาสตร์ เช่นเดียวกัน (Figure 5) ในระหว่างวันที่ 1-31 มีนาคม ค.ศ. 2023 เครื่องวัด ADR1500 นี้จะนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm ที่ได้จากเครื่อง AEROBOX



Figure 2 The air pollution sensor (AEROBOX) for measuring PM2.5



Figure 3 The pyranometer for measuring solar irradiance



Figure 4 The sky camera for measuring cloud cover

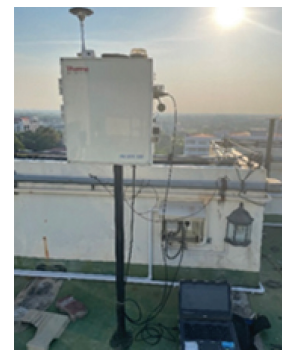


Figure 5 The Area Dust Monitor (ADR1500) for measuring PM2.5

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการประมวลผลข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm รายนาทีให้เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงในหน่วย $\mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซผู้วิจัยทำการเฉลี่ยค่าความเข้มข้นของก๊าซเฉพาะขณะราย 1 s ให้เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงในหน่วย W/m^2 ส่วนข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าประมวลผลให้เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm รายชั่วโมงที่ได้จากเครื่อง AEROBOX โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 μm รายชั่วโมงที่ได้จากเครื่อง ADR1500 ในระหว่างวันที่ 1-31 มีนาคม ค.ศ. 2023 เวลา 7:00-18:00 น. และบอกความแตกต่างของข้อมูล

ทั้ง 2 ชุดในรูปของ root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) ตามสมการ

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PM_{2.5,AEROBOX,i} - PM_{2.5,ADR1500,i})^2}{N}} \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N PM_{2.5,AEROBOX,i}}{N} \quad (2)$$

เมื่อ

$PM_{2.5,AEROBOX,i}$ คือ ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm ที่ได้จากเครื่อง AEROBOX ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$PM_{2.5,ADR1500,i}$ คือ ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm ที่ได้จากเครื่อง ADR1500 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

N คือ จำนวนข้อมูล (-)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm และความเข้มข้นของอนุภาคที่ผู้วิจัยทำการคัดเลือกวันและเวลาที่มีสภาพท้องฟ้าปราศเมฆ เพื่อตัดผลกระทบของเมฆออกไปซึ่งจะทำให้เห็นผลกระทบของฝุ่นละอองชัดเจนมากขึ้น โดยใช้ค่าปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าเป็นเกณฑ์ดังแสดงใน Table 1 (Bahmanbeiglou & Movahedi, 2017) ผู้วิจัยจะเลือกเฉพาะข้อมูลในวันและเวลาที่มีค่าปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าอยู่ระหว่าง 0-25% เท่านั้น นั่นคือสภาพท้องฟ้าเป็นแบบปราศจากเมฆ จากนั้นทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm และความเข้มข้นของอนุภาครายชั่วโมง โดยพิจารณาที่มุมเซนติเกรดของดวงอาทิตย์ค่าต่าง ๆ กัน ระหว่าง 0-80 องศา

สำหรับค่ามุมเซนติเกรดของดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด และเวลาที่กึ่งกลางชั่วโมง โดยพิจารณาตามสมการ (Iqbal, 1983)

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3)$$

เมื่อ

θ คือ มุมเซนติเกรดของดวงอาทิตย์ (degree)

δ คือ มุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (degree)

ϕ คือ ละติจูด (degree)

ω คือ มุมชั่วโมง (degree)

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาค (แกน y) และความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm (แกน x) ผู้วิจัยจะทำการหาค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าความสัมพันธ์และจุดตัดแกน y ของกราฟ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และค่า P-value และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของอนุภาคเมื่อค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm เท่ากับ 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จากค่าความเข้มข้นและจุดตัดของกราฟ แล้วหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับค่าเริ่มต้น

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm รายชั่วโมงที่ได้จากเครื่อง AEROBOX โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่อง ADR1500 ผลที่ได้แสดงดัง Figure 6

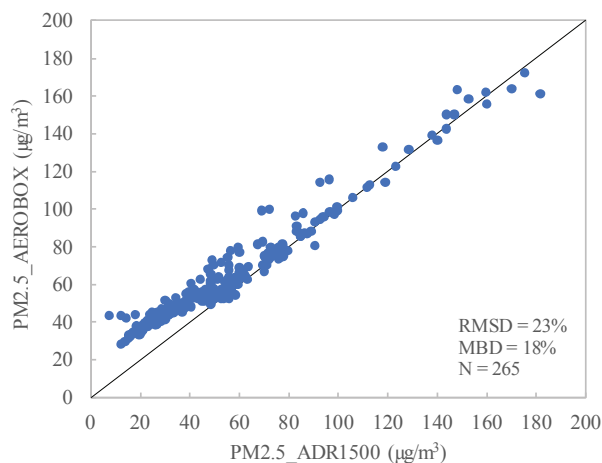


Figure 6 Comparison between PM2.5 measured from AEROBOX and ADR1500

จาก Figure 6 พบว่าค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm ที่ได้จากเครื่อง AEROBOX มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากเครื่อง ADR1500 โดยมีค่าความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD เท่ากับ 23% และ 18% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

สำหรับลักษณะการแปรค่าของความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm และความเข้มข้นของอนุภาครายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แสดงได้ดัง Figure 7 และ Figure 8

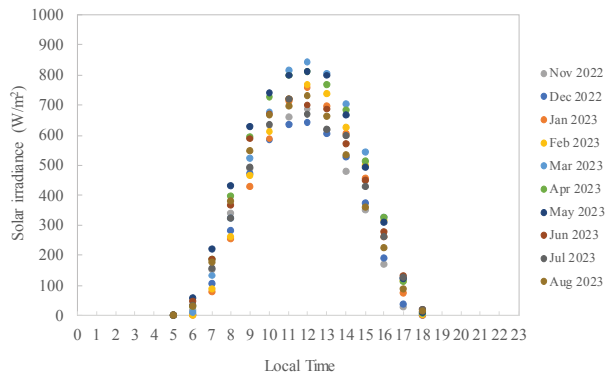


Figure 7 The variations of monthly average hourly solar irradiance

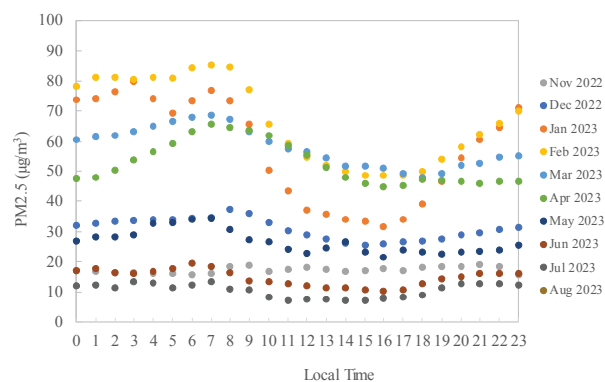


Figure 8 The variations of monthly average hourly PM2.5

จากรูปจะเห็นว่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จะมีค่าต่ำในช่วงเช้า (และช่วงเย็น) และมีค่าสูงในช่วงประมาณเที่ยงวัน ทั้งนี้เป็นผลจากตำแหน่งของดวงอาทิตย์นั่นคือเมื่อมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์มีค่าน้อย รังสีอาทิตย์จะเดินทางผ่านบรรยากาศด้วยระยะทาง (optical pathlength) ที่สั้นกว่ากรณีที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์มีค่ามากส่งผลให้เกิดกระบวนการลดทอนรังสีอาทิตย์ได้น้อยกว่า นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์จะสูงในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวโลกบริเวณจังหวัดนครปฐม

สำหรับความเข้มข้นของฝุ่นละอองจะมีค่าสูงตั้งแต่ประมาณเที่ยงคืนจนถึงประมาณ 8:00 น. และมีค่าลดลงในช่วงเที่ยงวัน ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มสูงขึ้นในระหว่างวัน ทำให้อากาศลอยตัวได้ดี ชั้นขอบเขตของบรรยากาศ (boundary layer) จึงมีค่าสูงขึ้น ฝุ่นละอองจึงกระจายตัวได้ดีทำให้ความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่พื้นผิวมีค่าต่ำลง นอกจากนี้จะเห็นว่าฝุ่นละอองจะมีค่าสูง (30-160 µg/m³) ช่วงเดือนมีนาคมและเดือนเมษายนซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน และมีค่าต่ำ (5-30 µg/m³) ในเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนทำให้เกิดการชะล้างฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เนื่องจากความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5

µm ผู้วิจัยทำการคัดเลือกข้อมูลในวันและเวลาที่มีสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยพิจารณาตามค่าปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าผลที่ได้แสดงดัง Table 1

Table 1 The number of data under different sky conditions between 15 November 2022-31 August 2023

Cloud cover (%)	Sky conditions	Number of data
0-25.0	Clear	564 (31.5%)
25.0-62.5	Partly cloudy	526 (29.3%)
62.5-100	Overcast	703 (39.2%)
Total	All	1,793 (100%)

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่าที่สถานีวัดรังสีอาทิตย์จังหวัดนครปฐมส่วนใหญ่จะมีสภาพท้องฟ้าเป็นแบบมีเมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้าคิดเป็น 39.2% รองลงมาเป็นแบบท้องฟ้าปราศจากเมฆ (31.5%) และมีเพียง 29.3% ที่มีสภาพท้องฟ้าเป็นแบบมีเมฆบางส่วน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เลือกใช้เฉพาะข้อมูลในขณะที่มีสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆเท่านั้น

จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 µm และความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยแบ่งชุดข้อมูลออกตามช่วงของมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ระหว่าง 0-80 องศา ผลที่ได้แสดงดัง Figure 9 และ Table 2

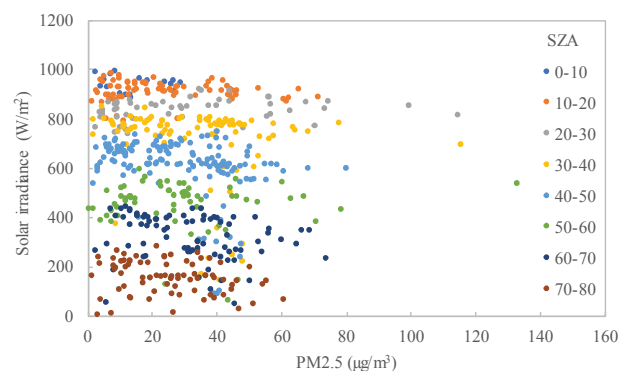


Figure 9 The relations between PM2.5 and solar irradiance at different solar zenith angles

จาก Figure 9 จะเห็นแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เมื่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 µm เพิ่มขึ้น และผลการวิเคราะห์ใน Table 2 แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 µm เพิ่มขึ้น ความชันของกราฟมีค่าเป็นลบหรือกล่าวได้ว่าการลดลงของความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นละออง

ขนาดไม่เกิน 2.5 μm มีความสามารถในการกระเจิงและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ (Luo *et al*, 2019) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Zhou *et al*, 2023) อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์มีค่าค่อนข้างต่ำและมีเพียงบางช่วงมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์เท่านั้นที่แสดงให้เห็นการลดลงของความเข้มรังสีอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95%

Table 2 Results of data analysis for the relation of hourly PM2.5 (x axis) and solar irradiance (y axis)

Solar zenith angle (degree)	Y intercept (W/m^2)	Slope ($\text{W/m}^2/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$)	Correlation coefficient (-)	P-value (-)	Change of solar irradiance under the increasing of 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2.5 (%)
0-10	948.3587	-0.6138	0.1632	0.5313	-0.06
10-20	909.9667	-0.0251	0.0104	0.9280	0.00
20-30	827.2620	0.3028	0.1853	0.1885	+0.04
30-40	758.3931	-1.3904	0.1705	0.1005	-0.18
40-50	674.4611	-2.4152	0.3166	0.0002*	-0.36
50-60	458.1181	-0.1292	0.0298	0.8135	-0.03
60-70	362.1439	-1.3129	0.2350	0.0371*	-0.36
70-80	184.9076	-1.0714	0.2293	0.0435*	-0.58

* Significant at the 95% confidence level

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm และความเข้มรังสีอาทิตย์ในกรณีท้องฟ้าปรอทเมฆโดยใช้ข้อมูลจากการวัดภาคพื้นดินที่จังหวัดนครปฐม ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 μm เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีค่าลดลงเนื่องจากฝุ่นละอองสามารถดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตามฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่อาจมีชนิดที่ต่างกันและมีผลต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังกล่าวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (สัญญาเลขที่ SRIF-JRG-2565-13) ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ Professor Dr. Sheng-Hsiang Wang และทีมนักวิจัยจาก Department of Atmospheric Sciences, National Central University, Taiwan ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องวัดมลพิษทางอากาศ รุ่น AEROBOX และขอขอบคุณนักศึกษาและนักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ รวมถึงภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- นิพนธ์ เกตุจ้อย & มรุพงษ์ กอนออยู่. (2555). การศึกษาผลกระทบของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการผลิตไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*. 32(5), 554-562.
- Ahmad, M., Manjantrarat, T., Rattanawongsa, W., Muensri, P., Saenmuangchin, R., Klamchuen, A., Aueviriyavit, S., Sukrak, K., Kangwansupamonkon, W. & Panyametheekul, S. (2022). Chemical Composition, Sources, and Health Risk Assessment of PM2.5 and PM10 in Urban Sites of Bangkok, Thailand, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14281. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114281>.
- Amnuaylojaroen, T., Surapipith, V. & Macatangay, R.C. (2022). Projection of the Near-Future PM2.5 in Northern Peninsular Southeast Asia under RCP8.5. *Atmosphere*, 13(305), 1-15. <https://doi.org/10.3390/atmos13020305>
- Bahmanbeiglou, K.H. & Movahedi, S. (2017). Identifying sky conditions in Iran from MODIS Terra and Aqua cloud products. *Chinese Geographical Science*, 27, 800-809, <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0908-4>.

- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York.
- Janjai, S. (2010). A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment, *Solar Energy*, 84(9), 1685-1695. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.017>.
- Janjai, S., Pankaew, P. & Laksanaboonsong, J. (2009). A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics, *Applied Energy*, 86(9), 1450-1457. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.005>.
- Kambezidis, H.D. (2021). The Solar Radiation Climate of Greece. *Climate*, 9(183), 1-19. <https://doi.org/10.3390/cli9120183>.
- Luo, H., Han, Y., Lu, C. Yang, J. & Wu, Y. (2019). Characteristics of Surface Solar Radiation under Different Air Pollution Conditions over Nanjing, China: Observation and Simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36, 1047-1059. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-9010-4>.
- Munyaneza, J., Qaraah, F.A., Jia, Q., Cheng, H., Zhen, H. & Xiu, G. (2022). Seasonal Trends, Profiles, and Exposure Risk of PM2.5-bound Bisphenol Analogs in Ambient Outdoor Air: A Study in Shanghai, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 210324. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210324>.
- Narkwatchara, P., Ratanatamskul, C. & Chandrachai, A. (2020). Effects of particulate matters and climate condition on photovoltaic system efficiency in tropical climate region. *Energy Reports*, 6, 2577-2586. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.016>.
- Peng-in, B., Sanitluea, P., Monjatturat, P., Boonkerd, P. & Phosri, A. (2022). Estimating ground-level PM2.5 over Bangkok Metropolitan Region in Thailand using aerosol optical depth retrieved by MODIS. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 15. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01238-4>.
- Qian, Y., Wang, W.G., Leung, L.R. & Kaiser, D.P. (2007). Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: The role of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 34, L12804, <https://doi.org/10.1029/2006GL028800>.
- Southerland, V.A., Brauer, M., Mohegh, A., Hammer, M.S., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Apte, J.S. & Anenberg, S.C. (2022). Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM2.5) and attributable health burdens: estimates from global datasets, *The Lancet Planetary Health*, 6(2), e139-e146. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00350-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00350-8).
- Zhou, L., Sun, L., Luo, Y., Xia, X., Huang, L., Liao, Z. & Yan, X. (2023). Air pollutant concentration trends in China: correlations between solar radiation, PM2.5, and O3. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 16, 1721-1735. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01368-3>.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 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 ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้

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 ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

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

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

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

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

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

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

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

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

ตัวอย่าง:

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

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

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

ตัวอย่าง:

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

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

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

Instruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

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

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Aim and Scope:

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

Ownership

Maharakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-distict, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4375 4416 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
Dr.Adrian Roderick Plant
Maharakham University

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation
and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Rungwisai
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 43 ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน - ธันวาคม 2567

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

