

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 43 Number 5 September - October 2024

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN



ขอขอบคุณภาพจาก : อาจารย์อิสเรศ สุขเสณี
อาจารย์ประจำคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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 ไปไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

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

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละออศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานแป๊ะ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าศิริวงษ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรธนา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนอมแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกษัชกร ดร.รักษจินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Dr.Adrian Roderick Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัทตรีวิไล 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

ในวาระสารบัญนี้ เราได้นำเสนอผลงานวิจัยที่มีความหลากหลายและลึกซึ้งในหลายสาขาวิชาที่มีความสำคัญ บทความในฉบับนี้ครอบคลุมทั้งในด้านวิทยาศาสตร์การเกษตร ชีววิทยา คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ คณิตศาสตร์ และวิทยาศาสตร์กายภาพ ซึ่งล้วนแต่เป็นผลงานวิจัยที่สะท้อนถึงความก้าวหน้าและการประยุกต์ใช้ความรู้ในแต่ละสาขา กล่าวคือ ในสาขาวิทยาศาสตร์การเกษตร บทความแรกได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมสำหรับพืชหมัก โดยเน้นถึงผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ บทความถัดมาได้นำเสนอการผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แบ่งน้ำยางชัน ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่มีศักยภาพในการปรับปรุงดิน และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ในสาขาชีววิทยา การศึกษาความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุ่มชื้นผาต่ำ จังหวัดเลย ได้ให้ข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการอนุรักษ์และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ดังกล่าว

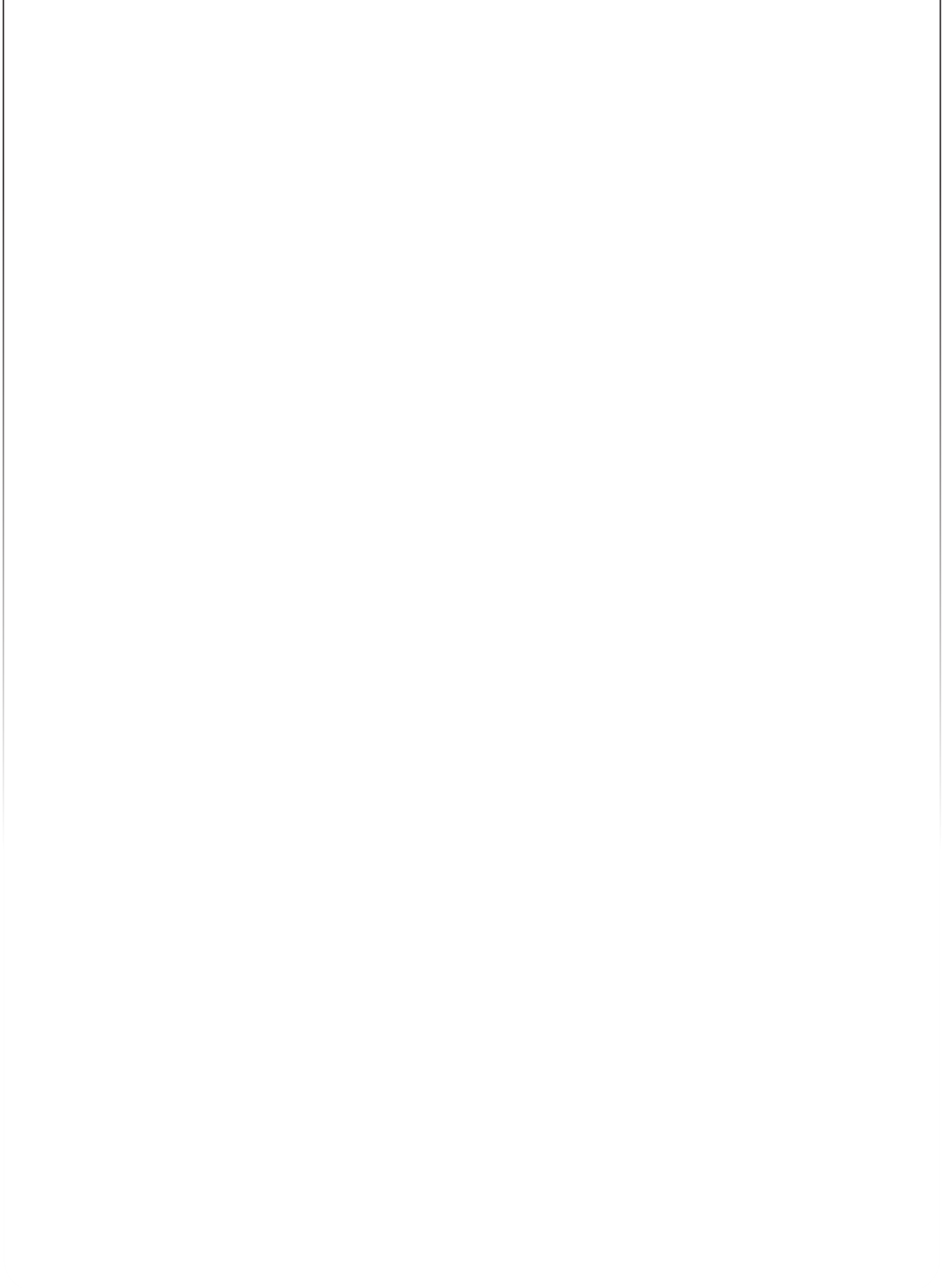
ในสาขาคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ บทความเกี่ยวกับการอนุรักษ์ในรูปแบบดิจิทัลของแหล่งซากดึกดำบรรพ์รอยตีนไดโนเสาร์แห่งแรกของประเทศไทย โดยใช้เทคนิคโฟโตแกรมเมตรีสำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ แสดงถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ในการอนุรักษ์แหล่งทรัพยากรทางประวัติศาสตร์ ด้านคณิตศาสตร์ บทความที่นำเสนอเกี่ยวกับการจัดเรียงใหม่ของอนุกรมซ้อนกันและสูตรลัดทอน แสดงถึงความซับซ้อนของการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางทฤษฎีและปฏิบัติได้ สุดท้ายในสาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ บทความที่กล่าวถึงการคำนวณของตัวแปรสำหรับตัวแกว่งฮาร์มอนิกที่ถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าคงที่ โดยใช้วิธีการของซวิงเงอร์ เป็นการศึกษาในระดับทฤษฎีที่สำคัญ และบทความเกี่ยวกับชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามและระบบสมาร์ตอูดุณิยมวิทยาเพื่อการเกษตร แสดงถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการติดตามและวิเคราะห์สภาพอากาศ เพื่อส่งเสริมการเกษตรที่มีประสิทธิภาพ

วารสารฉบับนี้ได้รับรวบรวมผลงานวิจัยที่มีคุณภาพสูงในหลายสาขาวิชา หวังว่าผู้อ่านทุกท่านจะได้รับความรู้และแรงบันดาลใจจากบทความต่าง ๆ ในการพัฒนางานวิจัยและการประยุกต์ใช้ความรู้ในด้านของตนเอง

ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



สารบัญ

Agricultural Science

การใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมสำหรับพืชหมักต่อลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก 339
The use of yogurt as a silage additive on physical characteristics and chemical compositions of napier grass silage
ปณัฑ์ สุขสร้อย และ เจนจิรา นามี
Panut Sooksoi and Janejira Name

การผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แบ่งน้ำยางข้นเพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดิน 346
Production of compost from concentrated latex sludge as a soil amendment
กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์ และ เตือนใจ ปิยง
Kattinat Sagulsawasdipan and Tuanjai Piyang

Biological Science

ความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุมชนผาดำ อำเภอนาดวง จังหวัดเลย 357
Species diversity of plants in Pha Dum community forest, Na Duang district, Loei province
วิไลลักษณ์ สุทวีไล
Wilailux Sudwilai

Computer and Information Science

การอนุรักษ์ในรูปแบบดิจิทัลของแหล่งซากดึกดำบรรพ์รอยตีนไดโนเสาร์แห่งแรกของประเทศไทยโดยใช้เทคนิคโฟโตแกรมเมทรี 366
สำหรับแบบจำลอง 3 มิติ
Digital conservation of the first dinosaur tracksite of Thailand using photogrammetry for 3D modeling
คงกระพัน ไชยทองศรี และ สุรวุฒ สุธีธร
Kongkrapan Chaitongsri and Suravech Suteethorn

Mathematics

การจัดเรียงใหม่เป็นหนึ่งมิติของอนุกรมซ้อนกันและสูตรลดทอน 376
Rearrangement to one-dimensional iterated series and reduction formulas
รัชนาย ไช้แก้ว และ ฉัตรชัย พุฒิรุ่งโรจน์
Rachanai Kaikeaw and Chatchai Puttirongroj

การจำแนกผู้ที่มีความเสี่ยงต่อโรคมะเร็งเต้านมด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ กรณีศึกษา: โรงพยาบาลสุทธาเวช 386
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Classification of people at risk for breast cancer using decision tree algorithm, A case study of Suddhajej Hospital,
Mahasarakham University
ชัยยันต์ สุขหมั่น และ สุภาวดี วิชิตชาญ
Chaiyam Sukmun and Supawadee Wichitchan

Physical Science

การคำนวณของตัวแพร่สำหรับตัวแกว่งกวัดฮาร์โมนิกอย่างง่ายคู่ควบกับสนามไฟฟ้าคงที่ผ่านวิธีการของชวิงเงอร์ 393
Calculation of the propagator for a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field via Schwinger's method
ธณษา ชัยธนาปริษา และ นัฐพงษ์ ยงรัมย์
Thanasa Chaithanapreecha and Nattapong Yongram

ชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามและระบบสมาร์ทอตุณียมหาวิทยาลัยเพื่อการเกษตร 400
Automatic in-field weather stations and smart Met4Agriculture system
พัชรา เพชรวิโรจน์ชัย, รัชพันธ์ แดงกนิษฐ์, สิทธิวรนนท์, เกษรินทร์ ห่านประเสริฐ,
วัชรพล ทรัพย์วัฒน์, โกสินทร์ นวลจ้อย, ปราโมทย์ สีฆ้อง, เขมิกา พงษ์เมธี และ สมปราชญ์ ศรีถกกล
Patchara Petvirojchai, Touchanun Dangkanit Sitthiworanun, Kesrin Hanprasert,
Watcharapol Subwat, Kosin Nualjuice, Pramote Seekhong, Khemika Pongmethee
and Somprat Srithagon

การใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมสำหรับพืชหมักต่อลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก

The use of yogurt as a silage additive on physical characteristics and chemical compositions of napier grass silage

ปณัท สุขสร้อย^{1*} และ เจนจิรา นามิ¹
Panut Sooksoi^{1*} and Janejira Name¹

Received: 23 August 2023 ; **Revised:** 19 October 2023 ; **Accepted:** 6 November 2023

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมักที่เสริมด้วยโยเกิร์ต โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 10 ซ้ำ ได้แก่ 1) เสริมกากน้ำตาล 5% (กลุ่มควบคุม) 2) เสริมโยเกิร์ต 2% 3) เสริมโยเกิร์ต 3% และ 4) เสริมโยเกิร์ต 4% ระยะเวลาการหมัก 21 วัน ผลการทดลองพบว่า ลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์หมักของกลุ่มที่เสริมโยเกิร์ต 3% มีคะแนนรวมลักษณะทางกายภาพเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 22.81 คะแนน จัดเป็นพืชหมักระดับดีมาก ส่วนกลุ่มอื่น ๆ มีคะแนนรวมลักษณะทางกายภาพระดับดี ซึ่งเป็นระดับที่รองลงมา ด้านองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก ได้แก่ ความชื้น วัตถุแห้ง โปรตีนหยาบ อินทรีย์วัตถุ เถ้า เยื่อใยผนังเซลล์ และเยื่อใยลิกโนเซลลูโลส ของทุกกลุ่มการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่พบว่าปริมาณเยื่อใยหยาบของกลุ่มที่เสริมโยเกิร์ตทุกกลุ่มมีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่เสริมกากน้ำตาล ($P<0.05$) ดังนั้นการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในระดับ 3% ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์หมักมีลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่าการเสริมด้วยกากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมัก

คำสำคัญ: โยเกิร์ต, สารเสริมช่วยหมัก, หญ้าเนเปียร์หมัก, ลักษณะทางกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี

Abstract

The purpose of this study was to determine the physical characteristics and chemical composition of Napier grass silage inoculated with yogurt. The experimental design was a completely randomized design (CRD), divided into 4 groups with 10 replicates. The treatments were 1) 5% molasses added (control group), 2) 2% yogurt added, 3) 3% yogurt added and 4) 4% yogurt added. The fermentation period was 21 days. The results showed that the physical characteristics of the Napier grass silage with 3% yogurt added had the highest total score (22.81 points). This was classified as a very good silage. The other groups had good total scores for physical characteristics, which were at a secondary level. The chemical compositions (moisture, dry matter, crude protein, organic matter, ash, NDF and ADF) of Napier grass silage were not statistically different among all experimental groups ($P>0.05$). However, it was found that the crude fiber content of all yogurt-added groups was higher than that of the control group ($P<0.05$). Therefore, using yogurt as a silage additive at 3% resulted in Napier grass silage having better physical characteristics than using molasses as a silage additive.

Keywords: Yogurt, silage additive, napier grass silage, chemical composition, physical characteristic

¹ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี, 13180

² Bachelor of Science Program in Agriculture, Faculty of Agricultural Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani Province, 13180

* Corresponding author; e-mail address: panut@vru.ac.th

บทนำ

การทำพืชมักเป็นวิธีการเก็บถนอมพืชอาหารสัตว์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นวิธีการที่ช่วยเก็บรักษาพืชอาหารสัตว์ที่มีปริมาณผลผลิตที่สูง มีระยะเวลาเจริญเติบโตรวดเร็ว และคุณค่าทางอาหารที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝนที่มีพืชอาหารสัตว์ในปริมาณมาก และสามารถนำมาทำพืชอาหารสัตว์หมักเก็บไว้ใช้ในช่วงที่พืชอาหารสัตว์ขาดแคลน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูแล้ง ซึ่งในการเก็บถนอมพืชอาหารสัตว์ในรูปแบบการหมักนี้มีข้อดีคือ สามารถช่วยในการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาได้เป็นเวลานาน โดยที่ส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืชและคุณค่าทางอาหารของพืชอาหารสัตว์ที่นำมาหมักไม่มีการเปลี่ยนแปลง (กรมปศุสัตว์, 2560) โดยการผลิตพืชมักที่มีคุณภาพดีมีปัจจัยหลายประการเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ชนิดพืชอาหารสัตว์ ขนาดชิ้นส่วนพืชอาหารสัตว์ ความชื้นที่เหมาะสม (65-70%) และต้องมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายง่าย (water-soluble carbohydrate; WSC) ที่เพียงพอ (มากกว่า 6%) สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก (lactic acid bacteria) เพื่อให้แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกนี้เปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่ละลายง่ายให้กลายเป็นกรดแลคติก มีผลทำให้ค่า pH ของพืชมักลดลง เป็นผลให้การทำงานของจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของพืชมักมีการหยุดทำงานลง ดังนั้นเกษตรกรที่ต้องการทำพืชมักหมักจึงมักมีการใช้สารเสริมช่วยหมัก ทั้งในรูปแบบของการเสริมแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก เช่น *Lactobacillus plantarum* และ *Lactobacillus buchneri* (Kiani *et al.*, 2012) และการเสริมแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ง่าย เช่น กากน้ำตาล เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สร้างกรดแลคติก ทำให้กระบวนการหมักเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถลดการสูญเสียโภชนาการของพืชอาหารสัตว์ในระหว่างกระบวนการหมักได้อีกด้วย (นริศรา คงสุข และคณะ, 2563) ซึ่งกรมปศุสัตว์ (2544) ได้แนะนำว่าพืชตระกูลหญ้าทั่วไปควรเสริมกากน้ำตาลในปริมาณ 3-5% โดยในปัจจุบันได้มีการผลิตสารเสริมช่วยหมักทางการค้าเพื่อจำหน่ายตามท้องตลาดในหลายรูปแบบ ซึ่งมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์การผลิตสัตว์เศรษฐกิจในปัจจุบันที่ต้นทุนค่าอาหารสัตว์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากประเทศไทยยังต้องอาศัยการนำเข้าวัตถุดิบอาหารสัตว์จากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ (กรมปศุสัตว์, 2566) ดังนั้นการมองหาสารช่วยหมักทางเลือกที่มีราคาถูกและเกษตรกรสามารถจัดหาได้ง่าย จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะส่งผลให้เกษตรกรสามารถแข่งขันในด้านต้นทุนการผลิตได้ โดยสารช่วยหมักที่เกษตรกรสามารถจัดหาได้ง่าย มีจำหน่ายทั่วไปไปตามท้องตลาด และมีราคาถูก ที่ผู้วิจัยสังเกตเห็นคือ โยเกิร์ต ซึ่งมีคุณสมบัติที่มีส่วนประกอบทั้งแบคทีเรียที่ผลิต

กรดแลคติก ได้แก่ *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus* (Kiani *et al.*, 2012) และแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ง่าย ได้แก่ นม จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าจะมีคุณสมบัติเป็นสารเสริมช่วยหมักที่ดีในการผลิตพืชมักหมักได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษารังนี้จึงมีขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมักที่มีการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมัก เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านการผลิตพืชมักหมักอันจะนำไปสู่การพัฒนาในการผลิตสัตว์ต่อไปในอนาคต

การทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ (Completely Randomized Design, CRD) การทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 10 ซ้ำ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์หมักเสริมกากน้ำตาล 5% (กลุ่มควบคุม), หญ้าเนเปียร์หมักเสริมโยเกิร์ต 2%, หญ้าเนเปียร์หมักเสริมโยเกิร์ต 3% และหญ้าเนเปียร์หมักเสริมโยเกิร์ต 4% โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง และการหมักหญ้าเนเปียร์

1.1 นำหญ้าเนเปียร์อายุ 45 วัน ตามคำแนะนำของกรมปศุสัตว์ (2545) ทำการตัดขีดดิน มาสับเป็นชิ้น ๆ ด้วยเครื่องสับหญ้าให้ได้ขนาดความยาวประมาณ 1-2.5 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 20 กิโลกรัม

1.2 เตรียมถุงดำหนา ซ้อนกันสองชั้น

1.3 นำหญ้าเนเปียร์สับมาทำการบรรจุลงในถุง ๆ ละ 20 กิโลกรัม และคลุกเคล้าสารเสริมช่วยหมักที่เตรียมไว้ให้เข้ากันดี ตามสูตรที่เตรียมไว้มี 4 กลุ่มการทดลอง ได้แก่

กลุ่มที่ 1 หญ้าเนเปียร์ 20 กิโลกรัม เสริมกากน้ำตาล 1 กิโลกรัม (5%)

กลุ่มที่ 2 หญ้าเนเปียร์ 20 กิโลกรัม เสริมโยเกิร์ต 400 กรัม (2%)

กลุ่มที่ 3 หญ้าเนเปียร์ 20 กิโลกรัม เสริมโยเกิร์ต 600 กรัม (3%)

กลุ่มที่ 4 หญ้าเนเปียร์ 20 กิโลกรัม เสริมโยเกิร์ต 800 กรัม (4%)

โดยโยเกิร์ตที่ใช้ในการทดลองเป็นโยเกิร์ตทางการค้า ซึ่งสามารถจัดหาได้ตามร้านสะดวกซื้อ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ นมผงโค 85% นมผงขาดมันเนย 1.6% และโปรตีนนมเข้มข้น 0.09% ผลิตโดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus*

1.5 หลังจากทำการบรรจุหญ้าเนเปียร์หมักที่คลุกเคล้ากับสารเสริมช่วยหมักครบทุกสูตรที่กำหนดไว้แล้ว ทำการดูตุอากาศที่เหลืออยู่ในถุงออกโดยใช้เครื่องดูดอากาศ เพื่อให้มี

สภาพไร้ออกซิเจน แล้วมัดปากถุงให้แน่น นำไปเก็บที่ร่ม หมักทิ้งไว้เป็นเวลา 21 วัน

1.6 ทำการสุ่มตัวอย่างหญ้าเนเปียร์หมักจากทุกถุง ๑ ๑ ละ 4 จุด คือ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของถุงหมัก เพื่อนำไปประเมินลักษณะทางกายภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป

2. การประเมินลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์หมัก

นำหญ้าเนเปียร์หมักที่ทำการเก็บรวบรวมมาทำการประเมินลักษณะทางกายภาพตามวิธีการของ กรมปศุสัตว์ (2547) ดัง Table 1 ได้แก่ กลิ่น ถ้าหญ้าหมักมีหอมคล้ายกลิ่น ผลไม้ดอง หรือน้ำส้มสายชู (12 คะแนน) ไม่หอม มีกลิ่นฉุนเล็กน้อย (8 คะแนน) มีกลิ่นฉุนมาก และเหม็นเล็กน้อย (4 คะแนน) และ เหม็นเน่า หรือมีกลิ่นรา (0 คะแนน) ด้านเนื้อพืชหมัก ถ้าหญ้าหมักมีเนื้อพืชหมัก แน่นมีส่วนใบและ ลำต้นที่ยังคงสภาพเดิม และไม่มีสิ่งเจือปน (4 คะแนน) แน่น ส่วนใบ

และลำต้นที่ยังคงสภาพเดิม และไม่มีเจือปน (2 คะแนน) แน่น ส่วนใบและลำต้นเปื่อยยุ่ยมาก มีสิ่งเจือปน (1 คะแนน) และเป็นเมือก และสกปรกมาก (0 คะแนน) ด้านสี สีเหลืองอมเขียว หรือสีเทา (3 คะแนน) สีเขียวอมเหลือง หรือสีเขียวเข้ม (2 คะแนน) สีน้ำตาลทอง (1 คะแนน) และสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ (0 คะแนน) ด้าน pH ถ้า 3.5-4.2 (6 คะแนน) 4.4-4.7 (4 คะแนน) 4.7-5.1 (2 คะแนน) >5.1 (0 คะแนน) เมื่อคะแนนรวม 20-25 = ดีมาก, 15-19 = ดี, 6-14 = ปานกลาง และ 0-5 = ต่ำ ให้คะแนนตัดสินโดยใช้ประสาทสัมผัสของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดำเนินการตามวิธีการของ Bal *et al.*, (1997) โดยนำตัวอย่างหญ้าเนเปียร์ที่หมักไว้ตามกลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 100 กรัม นำไปปั่นในโถปั่น (blender jar) ให้ละเอียด แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (pH meter model UB-5, Denver Instrument, Germany)

Table 1 Assessment of physical characteristics of silage

physical characteristics	
Smell	- mild, pleasantly acidic, pickled fruit or sour vinegar smell (12 point) - not mild, slight odor rancid (8 point) - odor rancid and slight putrid aroma (4 point) - musty or mouldy aroma (0 point)
Texture	- firm, material not easily rubbed from fibre (4 point) - firm, with softer material can be separated from fibre, slight slimy (2 point) - firm, soft tissues easily rubbed from fibre (1 point) - slimy and grimy (0 point)
Color	- light green-yellow or green brown (3 point) - yellowish green or brown green (2 point) - brown (1 point) - brown to black (0 point)
pH	- 3.5-4.2 (6 point) - 4.4-4.7 (4 point) - 4.7-5.1 (2 point) - >5.1 (0 point)
Total score	- 20-25 = very good quality - 15-19 = good quality - 6-14 = moderate quality - 0-5 = low quality

Note. From Silage standards (1st ed.) by, Department of Livestock Development, 2004, Printing House of the Agricultural Cooperatives Association of Thailand, Copyright ©2004 Department of Livestock Development.

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพืชหมัก โดยนำหญ้าเนเปียร์หมักแต่ละกลุ่มการทดลองมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน เมื่อตัวอย่างแห้งนำมาชั่งน้ำหนักแล้วบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี Proximate analysis ตามวิธีการของ AOAC (1996) ได้แก่ วัตถุแห้ง (dry matter) โปรตีนหยาบ (crude protein) เถ้า (ash) และเยื่อใยหยาบ (crude fiber) และวิธี Detergent method ตามวิธีการของ Goering and Van Soest (1970) ได้แก่ เยื่อใยผนังเซลล์ (NDF) และเยื่อใยลิกลินเซลลูโลส (ADF)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลของตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics 26.0

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์หมัก

การประเมินคุณภาพทางกายภาพของพืชหมักด้านกลิ่นของหญ้าเนเปียร์หมักของทุกกลุ่มการทดลองภายหลังจากการหมักเป็นเวลา 21 วัน เมื่อทำการเปิดถุงหมัก พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีลักษณะกลิ่นหอมคล้ายผลไม้ดองหรือน้ำส้มสายชู ซึ่งกลิ่นดังกล่าวเป็นกลิ่นที่ดีของพืชอาหารสัตว์หมัก แต่กลุ่มที่ใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมัก 3% มีระดับคะแนนการประเมินคุณภาพทางกายภาพของพืชหมักด้านกลิ่นสูงที่สุด (12 คะแนน) ด้านเนื้อสัมผัสของหญ้าเนเปียร์หมักทั้ง 4 กลุ่ม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยกลุ่มที่ใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมัก 3% มีการยุบตัวลงเล็กน้อย แต่ยังคงมีลักษณะแน่น ส่วนใบ และลำต้นยังคงเป็นสภาพเดิม และไม่มีสิ่งเจือปน

ส่วนกลุ่มที่เหลือ ได้แก่กลุ่มที่เสริมกากน้ำตาล 5% เสริมโยเกิร์ต 2% และเสริมโยเกิร์ต 4% มีการยุบตัวลงเล็กน้อย มีลักษณะแน่น ส่วนลำต้นเปื่อยยุ่ยเล็กน้อย สีนเป็นเมือก ซึ่งเป็นลักษณะดังกล่าวเป็นคุณภาพที่รองลงมา ด้านลักษณะสีของพืชหมักทั้ง 4 กลุ่ม พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยลักษณะของหญ้าเนเปียร์หมักของกลุ่มที่เสริมกากน้ำตาล 5% จะมีลักษณะสีน้ำตาลทอง มีคะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 1.00 จัดเป็นลักษณะของสีพืชอาหารหมักที่ไม่ดี ในขณะที่กลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 3% และ 4% มีลักษณะสีเหลืองอมเขียว หรือสีเทา กะแนนเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 2.66 และ 3.00 ตามลำดับ จัดเป็นลักษณะของสีที่ดีของพืชหมัก ส่วนลักษณะสีของหญ้าเนเปียร์หมักของกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 2% จะมีลักษณะสีเขียวอมเหลือง หรือเขียวเข้ม คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 2.00 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะสีดังกล่าวจัดเป็นคุณภาพที่รองลงมา ด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการใช้สารเสริมช่วยหมักในหญ้าเนเปียร์หมักทั้ง 4 กลุ่ม พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยหญ้าเนเปียร์หมักของกลุ่มที่เสริมด้วยกากน้ำตาล 5% มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 3.72 บ่งบอกได้ว่าเป็นระดับความเป็นกรด-ด่างที่ดีของพืชอาหารหมัก ส่วนกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 2% โยเกิร์ต 3% และโยเกิร์ต 4% มีค่าเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 3.81 และ 3.91 (ตามลำดับ) สูงกว่าหญ้าเนเปียร์หมักกลุ่มที่เสริมด้วยกากน้ำตาล 5% แต่ก็ยังเป็นระดับความเป็นกรด-ด่างที่ดีที่สุดของพืชอาหารหมักเช่นเดียวกัน ด้านคะแนนรวมของลักษณะทางกายภาพของพืชหมักของทุกกลุ่มการทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่กลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 3% มีคะแนนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 22.81 จัดเป็นคะแนนรวมของลักษณะทางกายภาพของพืชหมักระดับดีมาก ในขณะที่ กลุ่มที่เสริมด้วยกากน้ำตาล 5% กลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 2% และกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 4% มีคะแนนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 16.05 19.88 และ 19.25 จัดเป็นคะแนนรวมลักษณะทางกายภาพของพืชหมักระดับดี ซึ่งเป็นระดับที่รองลงมา (Table 2)

Table 2 Physical characteristics of Napier grass silage

Physical characteristics	molasses 5%	yogurt 2%	yogurt 3%	yogurt 4%	P-Value	%CV
Smell	8.00	10.66	12.00	9.33	0.33	25.82
Texture	3.33	3.33	4.00	3.33	0.80	28.57
Color	1.00 ^a	2.00 ^b	2.66 ^c	3.00 ^c	0.00	13.27
pH	3.72 ^a	3.88 ^{bc}	3.81 ^b	3.91 ^c	0.00	1.17
Total score	16.05	19.88	22.81	19.25	0.23	18.62

^{a-c} Means within the same row with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

ผลจากการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักต่อลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ กลิ่น เนื้อสัมผัส สี และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของหญ้าเนเปียร์หมัก พบว่าลักษณะทางกายภาพด้านของกลิ่นของทุกกลุ่มการทดลอง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับรายงานของ Kiani *et al.*, (2012) ที่ได้ทำการศึกษาค่าการใช้อโยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการทำข้าวโพดหมัก โดยใช้โยเกิร์ตในปริมาณ 5% เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการใช้สารเสริมช่วยหมัก ทำการประเมินลักษณะทางกายภาพด้านกลิ่น ตามวิธีการของ Nikpourtehrani *et al.*, (1987) พบว่ากลุ่มที่ใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักมีระดับคะแนนประเมินลักษณะทางกายภาพด้านกลิ่นเฉลี่ยเท่ากับ 12.8 ในขณะที่กลุ่มควบคุมที่ไม่มีการใช้สารเสริมช่วยหมักมีระดับคะแนนประเมินลักษณะทางกายภาพด้านกลิ่นเฉลี่ยเท่ากับ 12.7 จากระดับคะแนนประเมินเต็ม 14 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งระดับคะแนนประเมินดังกล่าวเป็นลักษณะของกลิ่นคล้ายกลิ่นผลไม้ดอง บ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพด้านกลิ่นที่ดีของพืชหมัก ในส่วนของลักษณะทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยหญ้าเนเปียร์หมักในทุกกลุ่มการทดลองมีลักษณะส่วนใบและลำต้นที่ยังคงสภาพเดิม และไม่มียีสเชิงปน ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของพืชหมักตามเกณฑ์การประเมินจากสำนักงานพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2547) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kiani *et al.*, (2012) ที่พบว่าการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการทำข้าวโพดหมักไม่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัส ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการใช้สารเสริมช่วยหมัก โดยมีระดับคะแนนประเมินลักษณะทางกายภาพด้านเนื้อสัมผัสเฉลี่ยเท่ากับ 3.2 และ 3.1 ตามลำดับ จากระดับคะแนนประเมินเต็ม 4 ในส่วนของลักษณะทางกายภาพด้านสี พบว่ากลุ่มที่ใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักมีลักษณะทางกายภาพด้านสีในลักษณะของสีเหลืองอมเขียวหรือสีเทา ซึ่งก็เป็นลักษณะทางกายภาพของสีที่ดีที่สุดของพืชหมักตามเกณฑ์การประเมินจากสำนักงานพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2547) ในขณะที่กลุ่มควบคุมที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมัก โดยมีระดับคะแนนประเมินลักษณะทางกายภาพด้านสีเฉลี่ยต่ำที่สุด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีลักษณะทางกายภาพด้านสีเป็นสีเขียวอมเหลือง หรือเขียวเข้ม ซึ่งอยู่ในระดับที่รองลงมา ในส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของทุกกลุ่มการทดลองมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.72-3.91 ซึ่งเป็นค่าระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของพืชหมักที่ดีที่สุดตามเกณฑ์การประเมินจากสำนักงานพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2547) ที่กำหนดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ไว้ที่ 3.5-4.2 สอดคล้องกับรายงานของ Paulus *et al.*,

(2020) ที่ได้กำหนดระดับคุณภาพพืชหมักจากค่าระดับความเป็นกรด-ด่างไว้ดังนี้ ค่า pH ระดับ 3.0-4.2 อยู่ในระดับดีมาก ค่า pH ระดับ 4.2-4.5 อยู่ในระดับดี และ ค่า pH ระดับ 4.5-4.8 อยู่ในระดับปานกลาง สอดคล้องกับข้อมูลสนับสนุนจาก Sibel *et al.*, (2022) ได้ทำการศึกษาค่าการใช้อโยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการทำข้าวโพดหมัก โดยใช้โยเกิร์ตในปริมาณ 2%, 4%, 6% 8% และ 10% เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการใช้สารเสริมช่วยหมัก พบว่าทุกกลุ่มการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ยที่ 3.51-3.63 ซึ่งเป็นค่าระดับที่ดีที่สุดของพืชหมักเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับรายงานจากบุญส่ง และคณะ (2555) ที่ได้ทำการศึกษาค่าคุณภาพการหมักของหญ้าเนเปียร์ยักษ์หมัก โดยใช้กากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมักในปริมาณ 6% ที่ระยะเวลาในการหมัก 1 เดือนพบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ยเท่ากับ 3.96 ซึ่งเป็นค่าระดับที่ดีที่สุดของพืชหมักเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ผลจากการทดลองยังพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จะสูงขึ้นตามปริมาณการเสริมโยเกิร์ต ($P<0.05$) เนื่องจากโยเกิร์ตมีส่วนประกอบทั้งแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก ได้แก่ *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus* และแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ง่าย ได้แก่ น้านม ซึ่งช่วยเร่งปฏิกิริยาการหมักทำให้ค่า pH ลดลงได้เร็ว ทำให้การทำงานของจุลินทรีย์หยุดลงก่อนอย่างรวดเร็ว ในขณะที่กลุ่มที่เสริมกากน้ำตาลเพียงอย่างเดียวไม่มีการเสริมแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกค่า pH จะลดลงช้ากว่า จึงอาจเป็นผลให้มีค่า pH ที่ต่ำกว่า สอดคล้องกับรายงานของปฏิภาณ และเสาวลักษณ์ (2562) ที่ได้ศึกษาผลของการเสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติก ต่อคุณค่าทางโภชนาการของเปลือกและซังข้าวโพดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ระยะหมัก 28 วัน พบว่ากลุ่มที่เสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติกมีค่า pH สูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) มีค่าเท่ากับ 4.44 และ 4.27 ตามลำดับ และในขณะที่เดียวกันกลุ่มที่เสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติกมีปริมาณค่าเฉลี่ยกรดแลคติกสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) มีค่าเท่ากับ 3.74 และ 2.88% ของวัตถุดิบแห้ง ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าในกระบวนการหมักแบคทีเรียผลิตกรดแลคติกสามารถผลิตกรดแลคติกได้ในปริมาณมากกว่าและรวดเร็วกว่าจึงส่งผลให้ทำให้การทำงานของจุลินทรีย์หยุดลงก่อนอย่างรวดเร็ว

2. องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก

องค์ประกอบทางเคมีของพืชหมักของทุกกลุ่มการทดลองภายหลังจากการหมักเป็นเวลา 21 วัน เมื่อทำการเปิดถุงหมัก พบว่าปริมาณความชื้น (Moisture) วัตถุดิบแห้ง (DM) อินทรีย์วัตถุ (OM) เถ้า (Ash) และโปรตีนหยาบ (CP) ของหญ้าเนเปียร์หมักไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) ด้านปริมาณเยื่อใยหยาบ (CF) พบว่ากลุ่มของหญ้าเนเปียร์หมัก

ที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 2% กลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 3% และกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ต 4% มีปริมาณเยื่อใยหยาบเฉลี่ยเท่ากับ 40.09% 40.05% และ 39.90% ตามลำดับ สูงกว่ากลุ่มเสริมด้วยกากน้ำตาล 5% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่มี

ปริมาณเยื่อใยหยาบเฉลี่ยเท่ากับ 36.27% ในขณะที่ปริมาณเยื่อใยผนังเซลล์ (NDF) และเยื่อใยลิกโนเซลลูโลส (ADF) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ระหว่างกลุ่มทดลอง (Table 3)

Table 3 Chemical compositions of Napier grass silage (%DM basis)

Chemical compositions	molasses 5%	yogurt 2%	yogurt 3%	yogurt 4%	P-Value	%CV
Moisture	83.20	84.20	84.04	85.26	0.25	1.34
DM	16.80	15.80	15.96	14.74	0.07	7.14
OM	88.70	87.84	88.42	86.36	0.08	1.15
Ash	11.30	12.16	11.58	13.64	0.08	8.28
CF	36.27 ^a	40.09 ^b	40.05 ^b	39.90 ^b	0.04	4.09
CP	6.07	6.26	6.17	6.93	0.25	5.67
NDF	66.48	68.03	68.29	68.41	0.06	0.92
ADF	37.96	39.30	38.49	39.04	0.29	1.58

^{a-c} Means within the same row with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

ผลจากการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักต่อองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมัก พบว่าปริมาณความชื้นและวัตถุแห้งของทุกกลุ่มการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) สอดคล้องกับรายงานของ Kiani *et al.*, (2012) ที่พบว่าการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการทำข้าวโพดหมักไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น และวัตถุแห้ง ($P > 0.05$) แต่การเสริมโยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการศึกษาครั้งนี้ส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ($P = 0.25$) โดยกลุ่มที่ใช้กากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมักมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 83.20% ในขณะที่กลุ่มที่ใช้โยเกิร์ต 4% เป็นสารเสริมช่วยหมักปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 85.26% ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเสริมโยเกิร์ตที่มีเชื้อแบคทีเรีย *Lactobacillus bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus* มีส่วนให้เกิดกระบวนการย่อยสลายขึ้นในกระบวนการหมัก จึงมีการผลิตน้ำออกมามากขึ้น (Basso, 2013) ในขณะที่ปริมาณโปรตีนรวมเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับของการเสริมโยเกิร์ต ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sibel *et al.*, (2022) ที่ได้ทำการศึกษาคาร์โบไฮเดรตเป็นสารเสริมช่วยหมักในการทำข้าวโพดหมัก โดยใช้โยเกิร์ตในปริมาณ 2%, 4%, 6% 8% และ 10% พบว่ามีปริมาณโปรตีนหยาบเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริมโยเกิร์ตเช่นเดียวกัน (7.93%, 7.97%, 8.16% 8.22% และ 8.68% ตามลำดับ) เช่นเดียวกับรายงานของ Kiani *et al.*, (2012) ที่พบว่าปริมาณโปรตีนหยาบเฉลี่ยของข้าวโพดหมักจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมัก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกในโยเกิร์ตสามารถผลิตกรดแลคติกในปริมาณมากและรวดเร็วทำให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วจนส่งผลไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม proteolytic และหยุดการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีนลง ซึ่งเอนไซม์ดังกล่าวจะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรด (pH 3.8-4.5) (Sharp *et al.*, 1994) ดังนั้นเมื่อเสริมโยเกิร์ตจึงส่งผลให้ปริมาณโปรตีนหยาบในหญ้าหมักมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย ในส่วนปริมาณเยื่อใยหยาบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ตมีปริมาณเยื่อใยหยาบสูงกว่ากลุ่มที่เสริมด้วยกากน้ำตาล นอกจากนี้เยื่อใยผนังเซลล์ และเยื่อใยลิกโนเซลลูโลสของกลุ่มที่เสริมด้วยโยเกิร์ตก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ($P > 0.05$) ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากจุลินทรีย์จากโยเกิร์ตที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นในระหว่างการหมัก มีการหลั่งเอนไซม์ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (water-soluble carbohydrate; WSC) ซึ่งเป็นส่วนที่ย่อยได้ง่ายของหญ้าเนเปียร์ เพื่อผลิตเป็นกรดแลคติก ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างที่เป็นส่วนของเยื่อใยรวม เยื่อใยผนังเซลล์ และเยื่อใยลิกโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน Irsyammawati *et al.*, (2020) ได้รายงานว่าการใช้จุลินทรีย์ *Lactobacillus plantarum* เป็นสารเสริมในการทำหญ้าเนเปียร์แคะหมักพบว่าเยื่อใยหยาบมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) เมื่อมีการเสริมจุลินทรีย์ *Lactobacillus plantarum* ในระดับ 0%, 0.3%, 0.6% และ 0.9% โดยพบว่าปริมาณ

เยื่อใยหยาบมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเสริม *Lactobacillus plantarum* ในระดับ 0.6% (ปริมาณเยื่อใยหยาบเฉลี่ยเท่ากับ 23.94%)

สรุปผลการทดลอง

การใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักหญ้าเนเปียร์ส่งผลให้มีลักษณะทางกายภาพดีกว่าการใช้กากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมัก ซึ่งระดับของปริมาณการเสริมโยเกิร์ตที่เหมาะสมต่อลักษณะทางกายภาพสำหรับหญ้าเนเปียร์หมักคือระดับ 3% โดยมีผลให้กลิ่น และเนื้อสัมผัสที่ดี และมีความเป็นกรด-ด่างในระดับที่เหมาะสม และมีคะแนนประเมินลักษณะทางกายภาพของพืชหมักรวมเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 22.81 จัดเป็นคะแนนคุณภาพทางกายภาพของพืชหมักระดับดีมาก นอกจากนี้การใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักยังมีผลให้องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์หมักใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณความชื้น วัตถุแห้ง โปรตีนหยาบ อินทรีย์วัตถุ ถั่ว เยื่อใยผนังเซลล์ และเยื่อใยลิกโนเซลลูโลส ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) แต่พบว่าปริมาณเยื่อใยหยาบของกลุ่มที่เสริมโยเกิร์ตทุกกลุ่มมีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่เสริมกากน้ำตาล ($P<0.05$) ดังนั้นการใช้โยเกิร์ตเป็นสารเสริมช่วยหมักในระดับ 3% ส่งผลให้หญ้าเนเปียร์หมักมีลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่าการเสริมด้วยกากน้ำตาลเป็นสารเสริมช่วยหมัก สามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมในพืชหมักได้ ทำให้กระบวนการหมักเป็นไปโดยสมบูรณ์ และมีคุณภาพในระดับที่ดี

เอกสารอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. (2544). *หญ้าหมัก* (พิมพ์ครั้งที่ 1). โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กรมปศุสัตว์. (2545). *หญ้าเนเปียร์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กรมปศุสัตว์. (2547). *มาตรฐานพืชอาหารหมัก, กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กรมปศุสัตว์. (2560). *หญ้าหมัก*. URL: <https://secretary.dld.go.th/webnew/index.php/th/news-menu/dld-editorial-menu/2703-6-2560>. 1 พฤษภาคม.

กรมปศุสัตว์. (2566). *ข้อมูลสถิติ นำเข้า-ส่งออกอาหารสัตว์*. https://data.go.th/dataset/item_de26c80b-0571-4721-8a82-aeed70919906. 1 มีนาคม.

นริศรา คงสุข, ศิวชัย สังข์ศรีทวงษ์, เวทชัย เปล่งวิทยา, กิตติมา กองทอง และเสาวลักษณ์ แยมหมื่นอาจ. (2563). ผลของการเสริม *Lactobacillus plantarum* BCC 65951 ต่อคุณภาพการหมักของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมัก โดยวิธีวัดแก๊สในห้องปฏิบัติการและการย่อยสลายในกระเพาะรูเมน. *วารสารเกษตร*, 36(1), 145-153.

บุญส่ง เลิศรัตนพงศ์, วิทยา สุมาลย์, วิโรจน์ ฤทธิ์ฤทัย, และราไพโร นามสีลี. (2555). *การศึกษาคุณภาพของพืชหมักในถุงพลาสติกดำที่อายุการเก็บรักษาต่าง ๆ*. ใน, *รายงานผลงานวิจัยสำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ประจำปี พ.ศ. 2555*. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ปฏิภาณ หน่อแก้ว และเสาวลักษณ์ แยมหมื่นอาจ. (2562). ผลของการเสริมแบคทีเรียผลิตกรดแลคติก ต่อคุณค่าทางโภชนาการของเปลือก ชังข้าวโพดร่วมกับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ระยะการหมักต่าง ๆ. *วารสารแก่นเกษตร*, 47(ฉบับพิเศษ 2), 747-752.

AOAC. (2000). *Official Method of Analysis of AOAC*. (17th ed). Association of Official Analytical Chemists.

Bal, M.A., J.G. Coors., & Shaver, R.D. (1997). Impact of the maturity of corn for use as silage of dairy cows on intake, digestion and milk production. *Journal of Dairy Science*, 80(18), 2497-2503.

Basso, F. C. (2013). *Corn silage inoculated with microbial additives*. [Thesis, Universidade Estadual Paulista Campus de Jaboticabal].

Goering, H. K., & Van Soest, P. J. (1970). *Forage Fiber analysis (Apparatus Reagents, Procedures and Some Applications)*. Department of Agriculture.

Irsyammawati, A., Mashudi., & Ndaru, P. H. (2020). The Effect of *Lactobacillus plantarum* Addition and Fermentation Periods on Nutritive Value Dwarf Elephant Grass (*Pennisetum purpureum* cv Mott) Silage. *The 4th Animal Production International Seminar*. 24-27 October 2019. Malang, Indonesia.

Kiani, A., Fallah, R., & Azarfar, A. (2012). Effect of adding sour yoghurt and dough as bacterial inoculant on quality of corn silage. *African Journal of Biotechnology*, 11(50), 11092-11095.

Nikpourtehrani, K., Movahedi, A. H., Shamma, M., & Saedi, H. (1987). *Animal and poultry feed and their conservation methods*. Tehran University. Press.

Paulus, K. T., Gerson, F. B. & Hendrik, T. (2020). Physical characteristics analysis of complete silage made of sorghum forage, king grass and natural grass. *Earth and Environmental Science*, 465, 1-6.

Sharp, R. P., Hooper, G. & Armstrong, D. G. (1994). The digestion of grass silages produced using inoculants of lactic acid bacteria. *Grass Forage Science*, 49, 42-53.

Sibel, S. O., Kadir, E., & Onder, C. (2022). Effects of Sour Yogurt as an Alternative Additive in Second Crop Corn Silage. *Fermentation*, 8, 494-508.

การผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แป้งน้ำยางชั้นเพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดิน

Production of compost from concentrated latex sludge as a soil amendment

กัตตินาฏ สกกุลสวัสดิพันธ์¹ และ เตือนใจ ปิยัง^{2*}

Kattinat Sagulsawasdipan¹ and Tuanjai Piyang^{2*}

Received: 3 July 2023 ; Revised: 16 October 2023 ; Accepted: 27 November 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและศึกษาสมบัติของปุ๋ยหมักที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน 4 ชุดการทดลอง ที่อัตราส่วนผสมกากชี้แป้ง : ยูเรีย : มูลวัว เท่ากับ 3.0:0:0 2.0:0.5:0.5 2.0:1.0:0 และ 2.0: 0:1.0 โดยศึกษาสมบัติของปุ๋ยหมักระหว่างการหมัก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า และค่าอินทรีย์วัตถุ ผลการศึกษาพบว่า ปุ๋ยหมักกากชี้แป้งโรงงานน้ำยางชั้นใช้ระยะเวลากระบวนการหมักสมบูรณ์เป็น ระยะเวลา 50 วัน มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเฉลี่ย 29.80-38.06 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความชื้น 78.92 - 81.82 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง 8.34 - 8.48 มีค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้า 3.18 - 6.13 เดซิซีเมนต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยอินทรีย์วัตถุ 38.51-42.71 สำหรับธาตุอาหารหลักของปุ๋ยหมักกากชี้แป้งและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ผลตอบแทนจากการลงทุนพบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากชุดการทดลองที่ 2 มีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมมากที่สุด โดยมีค่าธาตุไนโตรเจนร้อยละ 4 มีค่าฟอสฟอรัส (P_2O_5) ร้อยละ 0.95 และมีค่าโพแทสเซียม (K_2O) ร้อยละ 0.39 เมื่อนำปุ๋ยหมักกากชี้แป้งมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ผลตอบแทนจากการลงทุน เท่ากับ 48.47 เปอร์เซ็นต์ มีกำไรสุทธิเฉลี่ย เท่ากับ 1,537.60 บาทต่อรอบการผลิต ซึ่งการทำปุ๋ยหมักจากกากชี้แป้งน้ำยางชั้นมีธาตุอาหารที่พืชต้องการต่อการเจริญเติบโตของพืชได้

คำสำคัญ: กากชี้แป้ง, ปุ๋ยหมัก, วัสดุปรับปรุงดิน

Abstract

This research investigated the production of compost from concentrated latex sludge as a conditioner and studied the properties of the compost in four different experiments using different ratios of composting ingredients: concentrated latex sludge, urea, and cow manure. The different ratios were used were: 3.0:0:0, 2.0:0.5:0.5, 2.0:1.0:0, and 2.0:0:1.0, respectively. All compost formulations were analyzed for their properties, specifically the average of: temperature, moisture content, pH, electrical conductivity, and organic matter. It was shown that a suitable compost fermentation period lasted for 50 days. The properties of the compost derived from concentrated latex sludge included an average temperature range of 29.80-38.06 °C, the percentage of moisture content ranged from 78.92% to 81.82%, pH was between 8.34 - 8.48, electrical conductivity (EC) was 3.18 - 6.13 decisiemens/meter, and quantity of organic matter ranged from 38.51%-42.71%. Among treatments, the compost in the second treatment with the ratio 2.0:0.5:0.5 was found to be the most suitable, showing the greatest economic value and investment return due to its superior N: P: K content which was the highest in the experiment. Specifically, the percentage contents of N, P, K were 4, 0.95%, and 0.39% respectively. In analysis of economical value, the compost yielded a return on investment 48.47% and a net

¹ อาจารย์, สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง

² หน่วยจัดการงานวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง

¹ Department of Marine and Environmental Sciences, Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Sikao, Trang

² Area - Based Collaborative Research, Research and Development Institute, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Sikao, Trang

* Corresponding author: Tuanjai Piyang, E-mail: tuanjai.p@rmutsv.ac.th

profit of 1,537.80 Baht per production cycle. In conclusion, the production of compost from concentrated latex sludge contained primary micronutrients and had potential for promoting plant growth as a soil conditioner.

Keywords: Latex sludge, compost, soil amendment

บทนำ

อุตสาหกรรมน้ำยางข้นของไทยอยู่ในอันดับหนึ่งของโลกในแต่ละปีไทยผลิตเพื่อส่งออกสัดส่วน 75.9% ครองส่วนแบ่งตลาดเป็นอันดับ 1 สัดส่วน 70% ของปริมาณการค้าน้ำยางข้นทั่วโลก มีมูลค่าตลาดประมาณ 50,000 ล้านบาท แต่ตลาดส่งออก 50% อยู่ที่มาเลเซีย รองลงมา ตลาดจีน 33.5% และเกาหลีใต้ 1.8% (ประชาชาติธุรกิจ, 2565) โดยน้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กุ้งมือยาง กุ้งยางอนามัยลูกโป่ง หัวนมยาง และเส้นด้ายยาง เป็นต้น (สถาบันพลาสติก, 2559) การผลิตน้ำยางข้นจึงจำเป็นต้องกำจัดแมกนีเซียมออกจากน้ำยางดิบก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยกระบวนการเติมสารเคมีเช่น Diammonium Hydrogen Phosphate (DAP) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในอัตราส่วน Mg:DAP เท่ากับ 1:5.5 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2011) จากกระบวนการตกตะกอนแมกนีเซียมออกจากน้ำยางดิบ ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวปนเหลืองอ่อนหรือสีน้ำตาลคล้ำ นอกจากนี้ยังมีสารพวกแป้ง ผุ่นไขมัน โปรตีน สารประกอบไนโตรเจน และมีสิ่งเจือปนอื่น รวมทั้งอนุภาคยางที่จับตัวที่มีอยู่ในน้ำยาง สารเหล่านี้จะตกตะกอนแยกตัวออกมาอยู่ในส่วนของก้นถังพักน้ำยางก่อนการปั่นหรืออยู่ในหม้อเครื่องปั่นระหว่างการปั่นน้ำยางข้น มีรายงานว่าการผลิตน้ำยางข้นแต่ละครั้งจะเกิดของเสียในรูปกากซีแ่งรวมเฉลี่ยเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำยางสดที่ใช้ในการผลิต หรือประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำยางข้นที่ผลิตได้ (Wanseng *et al.*, 2017) ส่วนใหญ่จะกำจัดทิ้งไปโดยการนำไปถมที่ถมถนนหรือเผาทิ้งซึ่งเป็นการจัดการของเสียที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และยังมีส่วนที่เหลือถูกกองทิ้งสะสมอยู่ในพื้นที่โรงงานก่อให้เกิดปัญหาด้านกลิ่นและเกิดน้ำชะล้างซึ่งมีสารเคมีรวมถึงแอมโมเนียปนเปื้อน

จากการศึกษาพบว่า กากซีแ่งมีองค์ประกอบของธาตุอาหารต่าง ๆ ที่อยู่ในกากซีแ่งจะพบว่ามีประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส (P_2O_5) โพแทสเซียม (K_2O) แมกนีเซียม และยังมีสังกะสี (Zinc, Zn) โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.06-2.31, 19.4-19.6 (asP_2O_5), 1.5-1.8 (asK_2O), 5.24-5.31, และ 1.01-1.05% น้ำหนักแห้งตามลำดับ (วัลย์พร ผ่อนผัน, 2547) ซึ่งกากซีแ่งส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของโปรตีน และแอมโมเนียที่รวมกับแมกนีเซียมในรูปตะกอนโลหะไอออนในน้ำยางส่วนโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบของธาตุอาหารในดิน (ณิชาภา มินาบูลย์ และคณะ, 2565) การนำกากซีแ่งจาก

อุตสาหกรรมน้ำยางข้นมาใช้ประโยชน์จึงเป็นไปได้ เนื่องจากกากซีแ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยในรูปแบบปุ๋ยน้ำและปุ๋ยเม็ดได้หรืออาจนำไปปรับปรุงต่อเพื่อผลิตเป็นวัสดุอื่น ทั้งนี้การเลือกใช้กากซีแ่งมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมนับว่าเป็นการบริหารจัดการด้านมลพิษและสิ่งแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำยางข้น (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี และคณะ 2553) Jutarut *et al.*, (2018) การใช้ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้นเพื่อหมักด้วยการเติมจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูง และมูลไก่ลงในวัสดุที่หมักในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักเป็นตัวกระตุ้นหมักปุ๋ยได้ดี และพบว่าการเจริญเติบโตของผักคะน้าหลังจากใส่ปุ๋ยหมักให้ผลผลิตน้ำหนักรากสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี นอกจากนี้ นภารัตน์ ไวยเจริญ (2566) ผลการนำกากซีแ่งมาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการปลูกหน่อกล้วย พบว่าให้ผลดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี เมื่อปลูกในแปลงใหญ่ขึ้นต้นทุนการเตรียมกากซีแ่งที่เป็นแผ่นแห้งมูลค่าเพียง 1.3 บาทต่อกิโลกรัมแห่งสรุปได้ว่ามีศักยภาพสูงในการใช้ประโยชน์ของเสียในรูปกากซีแ่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นปุ๋ยทดแทนปุ๋ยเคมีในการปลูกหน่อกล้วยได้โดยไม่ต้องผ่านการหมักปุ๋ยก่อน

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจหาวิธีการนำกากซีแ่งจากโรงงานน้ำยางข้นมาผลิตเป็นปุ๋ยหมัก โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและคุณลักษณะทางกายภาพธาตุอาหารหลักของปุ๋ยหมักกากซีแ่งเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้นในการเพิ่มความร่วนให้กับดินลดต้นทุนการผลิต และยังลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีก่อให้เกิดและไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นเกษตรที่ยั่งยืนต่อไป

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. วิเคราะห์สมบัติกากซีแ่งทางกายภาพและเคมี

การเก็บตัวอย่างกากซีแ่งจำนวนสองโรงงานที่ผลิตน้ำยางข้นพื้นที่อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง จากนั้นนำตัวอย่างกากซีแ่งไปตากแดดให้แห้งซึ่งใช้เวลา 3-4 วัน จากนั้นนำไปบดกับเครื่องบดละเอียด โดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1.00 มิลลิเมตร โดยกากซีแ่งที่ผ่านการบดแล้วเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อเก็บรักษาความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยนำวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ก่อนการทดลอง ได้แก่ ค่าความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณธาตุอาหารหลัก ธาตุไนโตรเจนทั้งหมด ธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมด และธาตุ

โพแทสเซียมทั้งหมด และธาตุโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว และ สารหนู

2. ออกแบบอัตราส่วนผสมผลิตปุ๋ยหมักกากชี้แบ่ง

การผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แบ่งน้ำยางข้นเพื่อเป็น วัสดุปรับปรุงดิน วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design: CRD โดยแบ่งชุดการทดลอง 4 ชุดการ ทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำที่อัตราส่วนผสมกากชี้แบ่ง :

ยูเรีย : มูลวัว : กากน้ำตาล : เชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 3 : 0 : 0 : 0.5 : 10 รายละเอียดตั้ง (Table 1) การผลิตปุ๋ยหมักขนาด กองปุ๋ยหมักกวงคอนกรีตขนาด 100x35 เซนติเมตร ปุ๋ยหมัก 200 กิโลกรัม ซึ่งในระหว่างการหมักปุ๋ยรดน้ำปริมาณ 60 ลิตร ต่อหนึ่งชุดการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ หรือ 20 ลิตร รดน้ำ ในช่วงเวลา 07.0-08.00 น. ทุก 7 วัน จนกว่าหมักสมบูรณ์ และการกลับกองปุ๋ยหมัก ทุก 15 วัน

Table 1 Mixing ratio production of compost from concentrated latex sludge

Treatment	Mixing ratio (% by weight)				
	Latex sludge	Urea	Cow dung	Molasses	EM
1	3.0	0	0	0.5	1.0
2	2.0	0.5	0.5	0.5	1.0
3	2.0	1.0	0	0.5	1.0
4	2.0	0	1.0	0.5	1.0

3. ศึกษาสมบัติของปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งระหว่างการหมัก

ศึกษาสมบัติของปุ๋ยหมักระหว่างการหมัก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ (temperature) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความชื้น (moisture) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยทำการ ตรวจวัดทุกวัน สำหรับค่าอินทรีย์วัตถุ (organic matter) ตรวจวัดทุก 15 วัน ซึ่งทำการวิเคราะห์ช่วง 07.0-08.00 น. รายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

3.1 ค่าอุณหภูมิ (temperature) การวัดปริมาณ ความร้อน วิเคราะห์โดยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์ มีหน่วยวัด อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างวัตถุดิบ โดยใช้อัตราส่วนของตัวอย่างวัตถุดิบต่อน้ำ เท่ากับ 3 : 50 ใช้แท่ง แก้วคนตัวอย่างและน้ำให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ให้ตกตะกอนและวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วิเคราะห์ โดยเครื่องพีเอชมิเตอร์ (AOAC, 2000)

3.3 ค่าความชื้น (Moisture) นำตัวอย่างวัตถุดิบมา ชั่งน้ำหนัก (กรัม) แล้วบันทึกน้ำหนักที่ได้เป็นน้ำหนักก่อน อบจากนั้นนำตัวอย่างวัตถุดิบเข้าตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดตามเวลา นำตัวอย่างวัตถุดิบมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเป็นน้ำหนักหลังอบแห้ง ทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักหลังอบจะคงที่ (AOAC, 2000) วิเคราะห์ โดยวิธี Oven-drying method คำนวณความชื้น ดังนี้

$$\text{ค่าความชื้น (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

3.4 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) นำตัวอย่างวัตถุดิบ โดยใช้อัตราส่วนผสมโดยใช้ตัวอย่างวัตถุดิบต่อน้ำ เท่ากับ 1 : 10 คนให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที แล้วนำไป วัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (กรมวิชาการ เกษตร, 2551)

3.5 ค่าอินทรีย์วัตถุ (OM) โดยวิธี Gravimetric Loss on Ignition นำตัวอย่างวัตถุดิบมาอบในเตาเผา ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา อย่างน้อย 16 ชั่วโมง จากนั้นเผาตัวอย่างวัตถุดิบทั้ง 4 ประเภทที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (AOAC, 2000)

3.6 ศึกษาคุณสมบัติปุ๋ยหมักที่ผ่านกระบวนการหมัก สมบูรณ์ กรมวิชาการเกษตร (2551) การวิเคราะห์ ดังนี้

1. ธาตุไนโตรเจนทั้งหมด (total N) โดยใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method) เป็นวิธีที่สะดวกและ ให้ออกต้อง วิธีนี้มี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการย่อย การกลั่น และการไทเทรต

2. ธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P₂O₃) โดยวิธีวานาโดโมลิบเดตใช้กรดเข้มข้นผสม HClO₄ : HNO₃ ในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตรในการย่อยตัวอย่างปุ๋ยให้อยู่ใน รูปสารละลายฟอสเฟต จากนั้นทำให้เกิดสีกับVanadomolybdate Reagent เกิดเป็นสารเชิงซ้อนวานาโดโมลิบโดฟอสเฟต ซึ่งมีสีเหลืองวัดหาปริมาณฟอสเฟตด้วยเครื่องสเปกโทร โฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร แล้วเปรียบเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

Table 2 Properties chemical of compost from concentrated latex sludge

Parameter	Value	Organic Fertilizer Standard of Department of Agriculture (2014)
pH	7.54	5.5-8.5
Moisture (%)	25.53	30
Electrical conductivity (dS/m)	1.25	Not more than 6.00
Total nitrogen (%)	2.22	≥ 1.0
Total phosphorus (%)	21.60	≥ 0.5
Total potassium (%)	2.10	≥ 0.5
C/N Ratio (%)	18.18	≤ 20/1
Total lead (mg/kg)	310.00	≤ 500
Total arsenic (mg/kg)	35.00	≤ 50

3. ธาตุโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K₂O) โดยวิธี Flame Photometer Method โดยโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของสารละลายจะถูกความร้อนจากเปลวไฟทำให้เปลี่ยนเป็นอะตอม อะตอมของโพแทสเซียมจะปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนอะตอมของโพแทสเซียมที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง (กรมวิชาการเกษตร, 2551)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยวิธี Duncan 's new multiple range test (DMRT) กำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยใช้โปรแกรม SPSS

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ลักษณะทางกายภาพและเคมีกากชี้แบ่ง

กากชี้แบ่งที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้น สำหรับทำปุ๋ยหมัก ซึ่งมีค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P₂O₅) และค่าโพแทสเซียม (K₂O) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และธาตุโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว และ สารหนู เป็นต้น ผลการศึกษารายละเอียดดัง Table 2







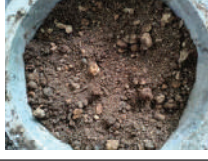








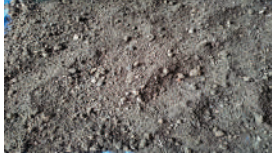
2. สมบัติของปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งระหว่างการหมัก

2.1 ลักษณะทางกายภาพในระหว่างการหมัก

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งจากโรงงานผลิตน้ำยางข้นในระหว่างการหมัก 4 ชุดการทดลองที่อัตราส่วนผสมกากชี้แบ่ง : ยูเรีย : มูลวัว : กากน้ำตาล : เชื้อจุลินทรีย์ พบว่าจากการสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของปุ๋ยหมักในระหว่างการหมัก ซึ่งสังเกตเห็น ขนาด และลักษณะของการย่อยสลายในระยะเวลาในการหมักปุ๋ยจนกว่ากระบวนการหมักสมบูรณ์ ผลการศึกษาพบว่าในสัปดาห์ที่ 2 ระยะเวลาการหมักได้ 14 วัน ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ในลักษณะของการย่อยสลาย และขนาดของวัตถุดิบ แต่สีของวัตถุดิบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมสำหรับสัปดาห์ที่ 4 ระยะเวลาการหมักได้ 28 วัน ทุกชุดการทดลองวัตถุดิบเริ่มมีการเปลี่ยนสี และมีการย่อยสลายทำให้ขนาดวัตถุดิบมีขนาดเล็กลง สำหรับในสัปดาห์ที่ 5 ระยะเวลาการหมักได้ 35 วัน ทุกชุดการทดลองวัตถุดิบเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลเข้มการย่อยสลายและเริ่มเปื่อยยุ่ย และสัปดาห์ที่ 6 ระหว่างวันที่ 42 - 50 วัน ทุกชุดการทดลองวัตถุดิบมีการเปลี่ยนสีเป็นสีดำและมีการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์เป็นระยะเวลาหมัก 50 วัน ทุกชุดการทดลอง ผลการศึกษาดัง Table 3

Table 3 Physical changes of compost from concentrated latex sludge

Treatment	Physical changes in compost of compost from concentrated latex sludge			
	1 - 14 day	15 - 28 day	29 - 42 day	Complete decomposition
1				
2				
3				
4				

2.2 ค่าอุณหภูมิ

อุณหภูมิการผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แบ่ง น้ำยางชั้นตรวจวัดอุณหภูมิทุกวันตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยหมักจนอุณหภูมิคงที่ แสดงดัง (Figure 1) พบว่าอัตราส่วนผสมกากชี้แบ่ง : ยูเรีย : มูลวัว ทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยการผลิตปุ๋ยหมักจากกากชี้แบ่งระยะเวลาการหมักเป็นระยะเวลา 50 วัน อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำปุ๋ยหมักเนื่องจากช่วยเร่งกระบวนการทำปุ๋ยหมักและสามารถบอกถึงอัตราการย่อยสลาย (Hafeez et al., 2018) จุลินทรีย์ที่ปรากฏในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักจะเป็นจุลินทรีย์มีโซไฟล์ (mesophile) จุลินทรีย์ที่เติบโตที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส (Chennaou et al., 2018) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในกองหมักเป็นผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในแต่ละชุดการทดลองมีอุณหภูมิก่อนข้างต่ำและแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแต่ละชุดการทดลองมีความใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการทดลอง มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ชุดการทดลองที่ 1 และ ชุดการทดลองที่ 4 เท่ากับ 37.01±4.08 และ 38.06±7.75 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญที่ระดับ P < 0.05 แต่มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิมีความแตกต่างกันกับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 เท่ากับ 30.82±1.37 และ 29.80±1.34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการศึกษา ดัง (Table 4) ค่าอุณหภูมิตั้งแต่ชุดการหมักปุ๋ยหมัก กากชี้แบ่ง ช่วงแรกชุดการทดลองที่ 1-3 อุณหภูมิจะต่ำและจะเพิ่มขึ้น และชุดการทดลองที่ 4 อุณหภูมิในช่วงแรกขึ้น ลง และอุณหภูมิลดลงและคงที่จนผ่านการหมักสมบูรณ์ ซึ่งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ชุดการหมักปุ๋ยหมัก กากชี้แบ่ง ช่วงแรกจะต่ำและจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากกิจกรรมย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ยิ่งการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์มากขึ้นเจริญเติบโตมากขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในกองหมักเป็นผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์สอดคล้องกับการศึกษาของเสาวนีย์ ก่อวุฒิกุล รังสี และคณะ (2553) อุณหภูมิภายในระบบหมักปุ๋ยก็จะสูงขึ้น อุณหภูมิที่พบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอยู่ในช่วง 28.83 - 52.33 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิที่พบสูงสุดในการทดลองนี้ไม่เข้าช่วง Thermoplic Phase ซึ่งอุณหภูมิเท่ากับ 45 - 60 องศาเซลเซียส ในกองปุ๋ยความชื้นค่อนข้างสูง เนื่องจากวัสดุหมักมีปริมาณความชื้นสูงเช่นเดียวกับผลการวิจัย

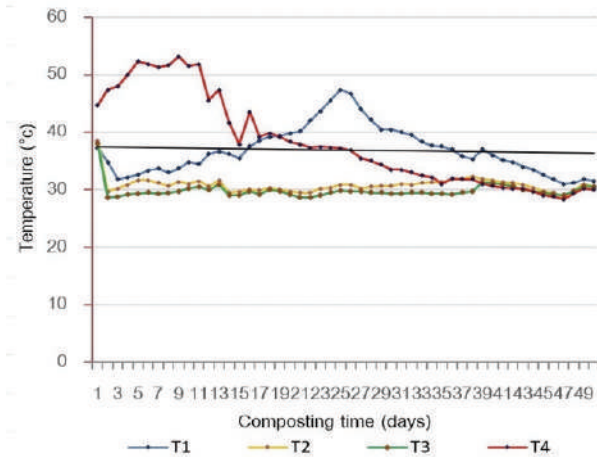


Figure 1 Changes in temperature in all experiments during the composting process.

2.3 ค่าความชื้น

ความชื้นการผลิตปุ๋ยหมักจากกากขี้แป้ง นำมาขึ้นตรวจวัดความชื้นทุกวันตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยหมัก แสดงดัง (Figure 2) ค่าความชื้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งน้ำจะถูกใช้จุลินทรีย์ในกระบวนการดูดซึมสารอาหารและกระบวนการขับถ่ายของเสีย ผลการทดลองพบว่า 4 ชุดการทดลองมีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 31.65 - 38.92 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการหมัก 50 วัน มีค่าความชื้นเฉลี่ยชุดการทดลองที่ 2 3 และ 4 เท่ากับ 31.63 ± 1.67 31.82 ± 2.05 และ 31.79 ± 1.80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความชื้นไม่เกินผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์กำหนดให้ค่าความชื้นไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $P < 0.05$ แตกต่างชุดการทดลองที่ 1 ที่มีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 38.92 ± 2.04 มากที่สุด เนื่องจากวัตถุดิบในการหมักหลักเป็นกากขี้แป้งเพียงอย่างเดียว มีขนาดใหญ่ และกักเก็บความชื้นได้ดี ผลการศึกษาดัง (Table 5)

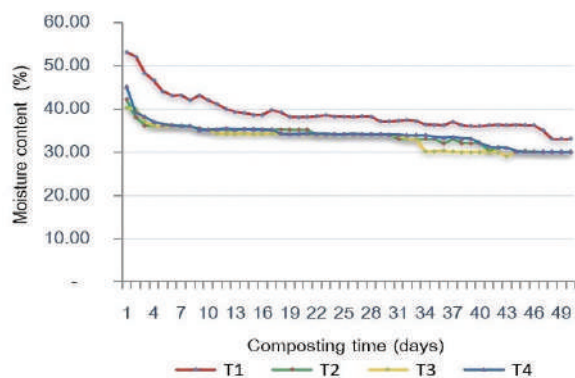


Figure 2 Changes in moisture content in all the experiments during the composting process

Table 4 Average temperature of compost from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea : cow manure	Average temperature
	(°C)
1 (3.0 : 0 : 0)	37.01 ± 4.08^b
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	30.82 ± 1.37^a
3 (2.0 : 1 : 0)	29.80 ± 1.34^a
4 (2.0 : 0 : 1)	38.06 ± 7.75^b

Note. a, b The difference is statistically significant at the level of $P < 0.05$

ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยหมักในช่วง 7 วันแรก พบว่ามีค่าความชื้นมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าความชื้นเริ่มลดลงทุกชุดการทดลอง เนื่องมาจากในช่วงแรกตัววัตถุดิบยังมีความชื้นอยู่ และขนาดของวัตถุดิบที่มีความหยาบ และขนาดใหญ่มีความสามารถเก็บความชื้นได้ดีส่งผลให้มีค่าความชื้นสูงในช่วงแรก ซึ่งการควบคุมความชื้นให้เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 50-60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการย่อยสลายที่สูงที่สุด (นภารัตน์ ไวยเจริญ, 2554) ซึ่งถ้าหากความชื้นมากเกินไปปุ๋ยหมักจะถูกอัดแน่นและลดปริมาณช่องว่างของอากาศภายในกองปุ๋ยทำให้เกิดสภาพการขาดออกซิเจนได้ (ศิรินทรา วันดี, 2552) แต่หากความชื้นน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้จุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายตายและการหมักปุ๋ยล้มเหลว (ประไพพรรณ จันทร์ทิพย์, 2559) จากการศึกษาของรเชศ ศรีสถิต (2553) การลดความชื้นในถึงหมักปุ๋ยสามารถทำได้โดยการพลิกกลับกองปุ๋ยให้เกิดการกระจายความชื้นออกไป ซึ่งเป็นวิธีแก้ไขปัญหาคความชื้นสูงในกองปุ๋ย

Table 5 Average moisture of compost latex sludge from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea : cow manure	Average moisture (%)	Organic Fertilizer Standard
1 (3.0 : 0 : 0)	38.92 ± 2.04^b	Not more than 35 %
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	31.65 ± 1.67^a	
3 (2.0 : 1 : 0)	31.82 ± 2.05^a	
4 (2.0 : 0 : 1)	31.79 ± 1.80^a	

Note. a, b The difference is statistically significant at the level of $P < 0.05$

2.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าการนำไฟฟ้าการผลิตปุ๋ยหมักจากกากซีแบ็ง น้ำยางข้นตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าทุกวันแสดงดัง (Figure 3) พบว่าการผลิตปุ๋ยหมักกากซีแบ็งทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตลอดระยะเวลาการทดลอง อยู่ในช่วงที่ 8.34-8.48 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) โดยกำหนดให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5.50 - 8.50 ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ชุดการทดลองที่ 1 และ 4 มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.34 ± 0.54 และ 8.38 ± 0.61 ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.48 ± 0.41 และ 8.48 ± 0.54 แตกต่างกับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $P < 0.05$ ผลการศึกษาดัง (Table 6) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของปุ๋ยหมักกากซีแบ็ง

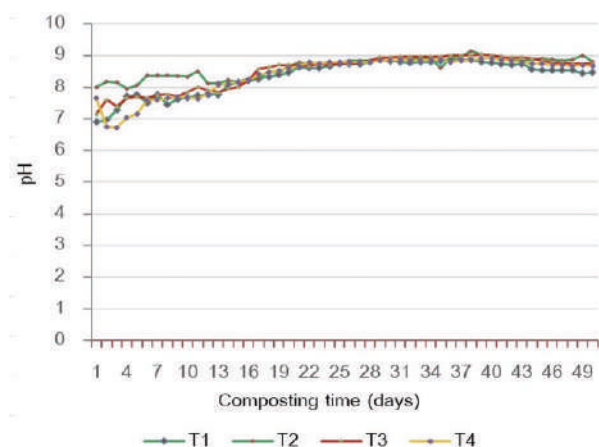


Figure 3 Changes in electrical conductivities (EC) in all experiments during the composting process

2.5 ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้าการผลิตปุ๋ยหมักจากกากซีแบ็งตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าทุกวันแสดงดัง (Figure 4) พบว่าค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าทั้ง 4 ชุดการทดลองตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าการนำไฟฟ้า (EC) อยู่ในช่วงที่ 3.18-5.85 เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์โดยกำหนดให้มีค่าการนำไฟฟ้าไม่เกิน 10 เดซิซีเมนต่อเมตร (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ซึ่งในการผลิตปุ๋ยจากกากซีแบ็งใช้ระยะเวลาการหมัก 50 วัน ผลการศึกษาดัง (Table 7) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 4 มีค่าเฉลี่ย

จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมักมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของปุ๋ยหมักจะเพิ่มสูงเรื่อย ๆ และเมื่อผ่านกระบวนการหมักใกล้หมักสมบูรณ์จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ลดลงและคงที่ Huang et al. (2004) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในกองปุ๋ยเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ได้ย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจากการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างในกองปุ๋ยหมักภายหลังกักสมบูรณ์แล้วจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่ pH อยู่ 8.00-8.48 เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แสดงถึงสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างในปุ๋ยหมัก ซึ่งค่ากรด-ด่าง (pH) ของวัสดุที่ทำปุ๋ยหมักจะส่งผลต่ออัตราการทำปุ๋ยหมักมีรายงานว่าการด่าง (pH) มีสภาพเป็นกรดในการทำปุ๋ยหมักที่ดี (Ameen et.al, 2016)

Table 6 Average (pH) of compost latex sludge from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea :	Average (pH)	Organic Fertilizer Standard
1 (3.0 : 0 : 0)	8.34 ± 0.54^a	5.5 - 8.5
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	8.48 ± 0.41^b	
3 (2.0 : 1 : 0)	8.48 ± 0.54^b	
4 (2.0 : 0 : 1)	8.38 ± 0.61^a	

Note. a, b The difference is statistically significant at the level of $P < 0.05$

การนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 3.18 ± 0.66 และ 3.41 ± 0.34 ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $P < 0.05$ แต่สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 5.85 ± 1.06 และ 5.24 ± 1.19 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $P < 0.05$ จากชุดการทดลองดังกล่าวค่าการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราส่วนผสมปุ๋ยยูเรียและมูลวัวเช่นเดียวกับการศึกษาของวิจิตรานามจิต (2563) ค่าการนำไฟฟ้าของวัตถุดิบมูลวัวเท่ากับ 5.98 เดซิซีเมนต่อเมตร

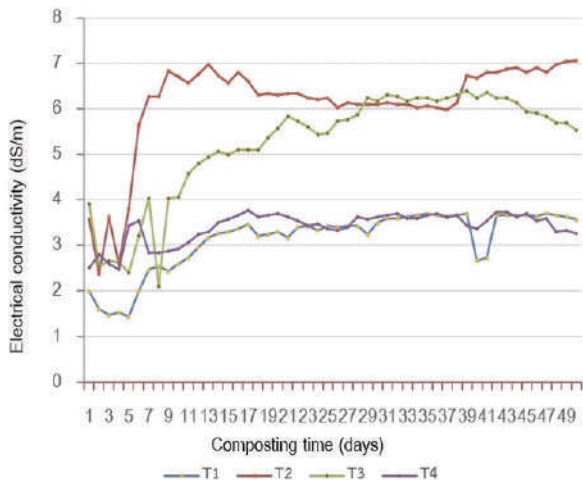


Figure 4 Changes in electrical conductivities (EC) in all experiments during the composting process

2.6 ค่าอินทรีย์วัตถุ (organic matter)

อินทรีย์วัตถุการผลิตปุ๋ยหมักจากกากขี้แป้งตรวจวัดค่าอินทรีย์วัตถุทุก 15 วัน ตลอดระยะเวลาการหมักปุ๋ยหมักพบว่าค่าเฉลี่ยอินทรีย์วัตถุทั้ง 4 ชุดการทดลองอยู่ในช่วงที่ 38.51 - 42.71 ทุกชุดการทดลองมีปริมาณอินทรีย์วัตถุไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยหมักอินทรีย์ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) พบว่าค่าเฉลี่ยอินทรีย์วัตถุ ชุดการทดลองที่ 1 3 และ 4 มีค่าเฉลี่ยอินทรีย์วัตถุ เท่ากับ 38.86±4.18 39.78±8.02 และ 38.51±8.03 ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ P < 0.05 ซึ่งแตกต่างกับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีค่าอินทรีย์วัตถุ เท่ากับ 42.71±6.62 ซึ่งมีปริมาณความชื้นมากที่สุดเนื่องจากอัตราส่วนผสมประกอบด้วยกากขี้แป้ง ปุ๋ยยูเรีย และมูลวัว ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บความชื้นได้ดีจึงส่งผลให้มีความชื้นมากที่สุดผลการศึกษาดัง (Table 8) เนื่องจากชุดการทดลองที่ 2 มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์สำหรับการเจริญเติบโตของพืชผลิตจากวัสดุอินทรีย์ของเสียจากกากขี้แป้ง มูลวัว จากการทดลองปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีแนวโน้มลดลงซึ่งในช่วงเริ่มต้น

Table 7 Average electrical conductivity of compost latex sludge from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea : cow manure	Average electrical conductivity (dS/m)	Organic Fertilizer Standard
1 (3.0 : 0 : 0)	3.18±0.66 ^a	Not more than 6 dS/m
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	5.85±1.06 ^b	
3 (2.0 : 1 : 0)	5.24±1.19 ^b	
4 (2.0 : 0 : 1)	3.41±0.34 ^a	

Note. a, b The difference is statistically significant at the level of P < 0.05

ของการหมัก พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ใน 10 วันแรก 38.50 - 53.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 40.55±1.20 52.45±2.22 52.35±3.10 และ 52.05±4.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจะมีแนวโน้มปริมาณอินทรีย์ลดลงตามระยะเวลาการหมักโดยมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าคงที่หรือมีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมักที่ 50 วัน ปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงอยู่ในช่วง 35.20-40.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมักที่ 50 วัน โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุที่หายไปจะอยู่ในแหล่งอาหาร และพลังงานให้กับจุลินทรีย์ การลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุเป็นผลมาจากการที่ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในวัสดุถูกย่อยสลายและนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานโดยจุลินทรีย์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ดังนั้นเมื่ออินทรีย์คาร์บอนลดลงปริมาณของอินทรีย์วัตถุจะลดลงไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Garcia et al., (2003) ที่ทำให้การทดลองเกี่ยวกับการใช้ตะกอนที่ได้จากการบำบัดผลมะกอกผสมไบโอมะกอก พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง

Table 8 Average organic matter of compost from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea : cow manure	Average organic matter	Organic Fertilizer Standard
1 (3.0 : 0 : 0)	38.86±4.18 ^a	Not lower than 30 (% by weight)
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	42.71±6.62 ^b	
3 (2.0 : 1 : 0)	39.78±8.02 ^a	
4 (2.0 : 0 : 1)	38.51±8.03 ^a	

Note. a, b The difference is statistically significant at the level of P < 0.05

2.7 ปริมาณธาตุอาหารหลักปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งที่ผ่านกระบวนการหมักสมบูรณ์

ปริมาณธาตุอาหารหลักการผลิตปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งที่ผ่านกระบวนการหมักสมบูรณ์เป็นระยะเวลา 50 วัน ทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าธาตุอาหารหลักชุดการทดลองที่ 2 มีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมมากที่สุด ซึ่งมีค่าธาตุไนโตรเจนเท่ากับ 4.00 ธาตุฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และธาตุโพแทสเซียมเท่ากับ 0.39 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมเท่ากับ 5.34 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่ 3, 4 และ 1 ซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารหลักเท่ากับ 5.30, 4.51 และ 4.17ตามลำดับ ผลการศึกษาตั้ง (Table 9) จากการทดลองชุดการทดลองที่ 2 มีปริมาณธาตุไนโตรเจนมากที่สุดเนื่องจากอัตราส่วนผสมในการหมักปุ๋ยประกอบด้วยมูลวัวซึ่งมีส่วนผสมของธาตุไนโตรเจนเช่นเดียวกับการรายงานของ Astarı et al., มูลวัวมีปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ และผสมรวมด้วยกับปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 ซึ่งมีปริมาณธาตุไนโตรเจน จึงส่งผลต่อปริมาณไนโตรเจนในการหมักปุ๋ยสูงที่สุด สำหรับชุดการทดลองที่ 4 มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำสุด และ ชุดการทดลองที่ 3 มีปริมาณโพแทสเซียม

ต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากมาจากอัตราส่วนผสมในการหมักจะส่งผลต่อธาตุอาหารหลัง ซึ่งปริมาณธาตุอาหารหลักที่สำคัญต่อพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยหรือเป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อช่วยปรับสภาพดินมีค่ากรด - เบสเป็นกลาง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของวิทยาลัยพร ผ่อนผัน (2547) ได้ทำการศึกษานำกากชี้แบ่งและกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ในการทำเป็นวัสดุบำรุงดินในการปลูกพืช พิจารณาจากการสะสมธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในพืชซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในการเติบโต และผลผลิตที่ได้จากพืชมีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างจากการใช้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งโรงงานน้ำยางชั้นร่วมกับมูลวัวมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษกับพืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นวัสดุบำรุงดินในการปลูกพืชได้ เช่นเดียวกับผลการวิจัย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปัญญา รัตน์ฑู (2565) ผลของการใช้ปุ๋ยหมักจากวัสดุอินทรีย์ผลพลอยได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักคะน้าทำให้ต้นคะน้ามีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตที่ดีกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยและอยู่ในระดับเดียวกันและสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมี

Table 9 Properties of primary macronutrients of compost from concentrated latex sludge

Treatment Latex sludge : urea : cow manure	Primary macronutrients (%)		
	Nitrogen (N)	Phosphorus (P ₂ O ₅)	Potassium (K ₂ O)
1 (3.0 : 0 : 0)	3.00	0.93	0.24
2 (2.0 : 0.5 : 0.5)	4.00	0.95	0.39
3 (2.0 : 1 : 0)	3.80	0.96	0.54
4 (2.0 : 0 : 1)	3.20	0.91	0.40

2.8 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนและผลตอบแทนจากการผลิตปุ๋ยหมักกากชี้แบ่ง พบว่าปุ๋ยหมักกากชี้แบ่งชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมกากชี้แบ่ง : ยูเรีย : มูลวัว : เท่ากับ 2.00 : 0.50 : 0.5 : มีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมมากที่สุด มีกำไรสุทธิเฉลี่ยเท่ากับ 1,537.60 บาทต่อรอบการผลิต และกำไรเหนือต้นทุนเงินสด เท่ากับ 1,742.60 บาทต่อรอบการผลิต โดยมีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 48.47 เปอร์เซ็นต์ ต้นทุนรวมในการผลิตปุ๋ยหมักเท่ากับ 3,172.40 บาทต่อรอบ

การผลิต แบ่งเป็นต้นทุนคงที่ไม่เป็นเงินสด เท่ากับ 205.00 บาทต่อรอบการผลิต โดยพบว่าเป็นค่าเสื่อมราคาเครื่องมือและอุปกรณ์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 39.00 ด้านต้นทุนผันแปรรวมเท่ากับ 2,967.40 บาทต่อรอบการผลิต ซึ่งพบว่าต้นทุนผันแปรที่สำคัญ ประกอบด้วย ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง คิดเป็นร้อยละ 50.55 ค่าวัสดุทางการเกษตร (จอบ พลั่ว กากน้ำตาล) ร้อยละ 23.59 และค่าแรงงาน (เตรียม ดูแลจัดการระหว่างการหมัก) คิดเป็นร้อยละ 23.59 ตามลำดับ ซึ่งวิเคราะห์จากการผลิตปุ๋ยหมักกากชี้แบ่ง 1,000 กิโลกรัม ผลการศึกษาตั้ง (Table 10)

Table 10 Cost and benefit analysis of produce of compost latex sludge from concentrated latex sludge

Item	Value in cash (Baht)	Non-cash value (Baht)	Percentage
1. Fixed cost			
1.1 Depreciation of tools and equipment		80.00	39.00
1.2 Opportunity cost for land use		50.00	24.40
1.3 Opportunity cost		75.00	36.60
Total fixed costs		205.00	100.00
2. Variable Costs			
2.1 Cement fermentation pond	200		6.74
2.2 Cost of materials (Spade, Shovels, Molasses, Urea)	700.00		23.59
2.3 Electricity charge	2.40		0.08
2.4 Cow manure	50.00		1.68
2.5 Cost effective microorganisms	150.00		5.05
2.6 Water charges	50.00		1.68
2.7 Fuel gas cost (Baht/production cycle)	1,500		50.55
Total variable cost	2,967.40	205.00	100.0
Total cost	3,172.40		
Total cash cost	2,967.40		
Total revenue (Baht/production cycle)	4,710.00		
Net profit	1,537.60		
Profit is above cash costs	1,742.60		
Return on investment (ROI) (%)	48.47		

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การผลิตปุ๋ยหมักจากกากขี้แบ่งโรงงานน้ำยางชั้นพบว่าชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมกากขี้แบ่ง : ยูเรีย : มูลวัว เท่ากับ 2.0 : 0.5 : 0.5 เป็นชุดการทดลองที่มีความเหมาะสมที่สุดใช้ระยะเวลาการหมักที่ 50 วัน พบว่ามีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 29.80-38.06 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความชื้นอยู่ระหว่าง 78.92 - 81.82 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 8.34 - 8.48 ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้า (EC) อยู่ในช่วงที่ 3.18 - 6.13 เดซิซีเมนต่อเมตร มีค่าเฉลี่ยอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) 38.51 - 42.71 และมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมมากที่สุดมีค่าธาตุไนโตรเจนเท่ากับ 4,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ธาตุฟอสฟอรัสเท่ากับ 950.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และธาตุโพแทสเซียมเท่ากับ 395.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมเท่ากับ 5,345.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับการผลิตปุ๋ยหมักกากขี้แบ่งมีกำไรสุทธิเฉลี่ยเท่ากับ 1,537.60 บาท/ต่อรอบการผลิต และกำไรเหนือต้นทุนเงินสด เท่ากับ 1,742.60 บาทต่อรอบการผลิตมีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 48.47

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยงบประมาณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. (2548). *วิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์*. <http://lib.doa.go.th/multim/e-book/EB00061.pdf>. (10 กันยายน 2566)
- กรมวิชาการเกษตร. (2557). *ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์*. <https://doi.nrct.go.th>.
- ณัฐพล ศรีเมือง. (2553). *การเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ และจุลชีววิทยาในการหมักปุ๋ยผักตบชวา* [วิทยาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ณิชาภา มินาบูลย์ ประพัฒน์ สีใส และ อภิเสฏฐ์ สุวรรณสะอาด. (2565). การพัฒนาชั้นรองพื้นทางบดอัดจากกากขี้เียงยางผสมซีเมนต์และกระดาษหนังสือพิมพ์เพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้น. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์*, 4(2), 53-64.
- ชเรศ ศรีสถิต. (2553). *วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นภารัตน์ ไวยเจริญ. (2554). *การทำปุ๋ยหมักของมูลฝอยจากตลาดสดในเขตเทศบาลหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นภารัตน์ ไวยเจริญ สมทิพย์ ด่านธีรวิชัย. (2566). การใช้ประโยชน์จากกากขี้เียงจากโรงงานน้ำยางข้นเพื่อผลิตปุ๋ยสำหรับในการปลูกหญ้าฉนวนน้อย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 4(2), 53-64.
- บัญชา รัตนีหนู. (2565). ผลของการใช้ปุ๋ยหมักจากวัสดุอินทรีย์ ผลพลอยได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักคะน้า. *วารสารแก่นเกษตร (ฉบับพิเศษ 1)*, 463-467.
- ประชาชาติธุรกิจ. (2564). *ไทยแชมป์โลกผลิตน้ำยางจ่อตั้งตลาดล่วงหน้า กำหนดราคา*. <https://www.prachachat.net/>. (10 กันยายน 2566)
- ประไพพรรณ จันทร์ทิพย์. (2559). *การทำปุ๋ยหมักผักตบชวา ร่วมกับกากตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำยางข้นและกากตะกอนจากโรงงานยางแท่ง STR 20*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ภิรมย์ขวัญ ชิดวงศ์ เกริกชัย ธนรักษ์ และ อรวรรณศิริรัตน์พิริยะ. (2557). ผลของการใช้กากขี้เียงเป็นแหล่งแมกนีเซียมเพื่อการเติบโตของปาล์มน้ำมันระยะอนุบาลหลัก. ใน *การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 14* (น. 776-782). วิทยาลัยการปกครองท้องถิ่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วลัยพร ผ่องผัน. (2547). การใช้ประโยชน์กากขี้เียงจากโรงงานผลิตน้ำยางข้นในรูปแบบบำรุงดิน. *วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 31(2), 53-70.
- วิจิตรา นามจิตร. (2563). *การปรับปรุงคุณภาพและการทดสอบประสิทธิภาพของ ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดที่มีส่วนผสมของแร่ลิโอเนาร์ไตต์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวาน* [วิทยาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยพะเยา]. มหาวิทยาลัยพะเยา.
- ศรินทร์า วันดี. (2552). *การศึกษาการนำของเสียโรงงานผลิตยางแท่ง (STR20) มาหมักปุ๋ย*. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี ยุพดี ชัยสุขสันต์ สมพร ประเสริฐส่งสกุล และสระเราะ นิยมเดชา. (2553). *การแปรสภาพกากขี้เียงจากอุตสาหกรรมน้ำยางข้นและการใช้ประโยชน์*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สถาบันพลาสติก. (2559). *รายงานการศึกษาเชิงลึกเรื่องความเป็นผู้นำในอุตสาหกรรมน้ำยางข้นและผลิตภัณฑ์จากน้ำยางข้นของไทย*. <https://rubber.oie.go.th/ArticleCategory.aspx?acid=3016>.
- Ameen, A., Ahmad, J., & Raza, S. (2016). Effect of pH and moisture content on composting of Municipal solid waste. *Int. J. Sci. Res. Publ.* 2016, 6, 35-37.
- AOAC. (2000). *Official methods of analysis*. 17th. AOAC International.
- Astari D. H., & Ratnaningsih, D. I. (2020). Bioconversion of cow dung and aassava peels with the vermicomposting method. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 2277-8616.
- Chennaou, M., Salama, Y., Aouinty, B., Mountadar, M. & Assobhei, O. (2018). Evolution of bacterial and fungal flora during In-Vessel composting of organic household waste under air pressure. *Journal of Mater Environmental Science*, 9, 680-68
- Garciaa, M., Raesb, D., & Jacobsen, S. (2003). Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the bolivian highlands. *Agricultural Water Management*, 60(2003), 119-134.
- Hafeez, M., Gupta, P., Gupta, Y.P. (2018). Rapid composting of different wastes with yash activator plus. *International Journal of Life Science Research*. 2018, 4, 1670-1674.
- Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T. & Nagar, B.B. (2004). Effect of CN on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management*, 24, 805-813.
- lewittayakorn, J., Chungsiriporn, J., & Rakmak, N. (2018). Utilization of waste from concentrated rubber latex industry for composting with addition of natural activators. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 40(1), 114-120.
- Wanseng, W., Danteravanich, S., & Chevakiadagarn, P. 2017, Investigation of excess sludge generated from activated sludge treatment plant of concentrated latex factories: An investigative case study in Southern Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*, 15(2), 51-61.

ความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุมชนผาดำ อำเภอหาดวัง จังหวัดเลย

Species diversity of plants in Pha Dum community forest, Na Duang district, Loei province

วิไลลักษณ์ สูดวิไล*

Wilailux Sudwilai*

Received: 18 September 2023 ; Revised: 16 October 2023 ; Accepted: 17 November 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายของพรรณไม้ในพื้นที่ป่าชุมชนผาดำ อำเภอหาดวัง จังหวัดเลย โดยวิธีการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมขนาด 20x20 เมตร สำหรับพรรณไม้ต้น และแปลงขนาด 5x5 เมตร สำหรับพรรณไม้พื้นล่าง จำนวนทั้งหมด 14 แปลง ผลการศึกษาพบพรรณไม้ทั้งหมด 29 วงศ์ 41 สกุล 45 ชนิด วงศ์ที่พบมากที่สุดคือวงศ์ Rubiaceae จำนวน 7 ชนิด รองลงมามีวงศ์ Dipterocarpaceae จำนวน 4 ชนิด จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า กลุ่มพรรณไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญ (IVI) สูงสุดคือ เต็ง (*Shorea obtusa* Wall. ex Blume) มีค่าเท่ากับ 150.160 รองลงมาก็คือ เหียง (*Dipterocarpus obtusifolius* Teijsm. ex Miq.) มีค่าเท่ากับ 43.442 ส่วนไม้พื้นล่างที่มีค่าดัชนีความสำคัญ (IVI) สูงสุดคือเพ็ก (*Vietnamosasa pusilla* (A.Chev. & A.Camus) T.Q.Nguyen) มีค่าเท่ากับ 52.709 รองลงมาก็คือ หญ้าน้ำหนู (*Fimbristylis dichotoma* (L.) Vahl) มีค่าเท่ากับ 13.881 ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (H') ไม้ต้นและไม้พื้นล่างมีค่าเท่ากับ 3.034 และ 2.645 ตามลำดับ ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว (J) มีค่าเท่ากับ 0.996 และ 0.832 และค่าความหลากหลายชนิดพันธุ์ (D) มีค่าเท่ากับ 7.531 และ 7.454 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบพืชหายากในประเทศไทยจำนวน 1 ชนิด ได้แก่ คำมอกหลวง (*Gardenia sootepensis* Hutch.) และพืชหายากของโลก (Rare) จำนวน 1 ชนิด คือ เหมือดคน (*Scleropyrum pentandrum* (Dennst.) Mabb.)

คำสำคัญ: ความหลากหลาย, ป่าชุมชน, พรรณไม้ต้น, ไม้พื้นล่าง, พืชหายากในประเทศไทย

Abstract

This research aimed to investigate the plant diversity within the Pha Dum community forest, located in Na Duang District, Loei Province. A total of 14 sampling plots, each measuring 20x20 m, were utilized to assess the diversity of trees, while a 5x5 m sampling plot was employed to examine understory plant diversity. The results revealed a rich variety of plant life, encompassing 29 families, 41 genera, and 45 species. Notably, the Rubiaceae stood out with 7 species, closely followed by the Dipterocarpaceae with 4 species. Among the tree species, *Shorea obtusa* Wall. ex Blume exhibited the highest Important Value Index (IVI) at 150.160, while *Dipterocarpus obtusifolius* Teijsm. ex Miq. followed with an IVI of 43.442. Furthermore, in the category of understory plants, *Vietnamosasa pusilla* (A.Chev. & A.Camus) T.Q. Nguyen had the highest importance value index (IVI) of 52.709, with *Fimbristylis dichotoma* (L.) Vahl following at 13.881. The species diversity index (H') for trees and understory plants was calculated to be 3.034 and 2.645, respectively. The evenness value (J) was 0.996 for trees and 0.832 for understory plants, while the diversity value (D) were 7.531 and 7.454, respectively. It is noteworthy to mention that *Gardenia sootepensis* Hutch. was identified as a rare species within Thailand, and *Scleropyrum pentandrum* (Dennst.) Mabb. was identified as a globally rare species.

Keywords: Diversity, community forest, tree, understory plant, rare species in Thailand

บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่แถบเส้นศูนย์สูตรมีสภาพภูมิอากาศที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจึงส่งผลให้มีความหลากหลายทางชีวภาพสูงแห่งหนึ่งของโลก ป่าไม้ของประเทศไทย มีสภาพป่าธรรมชาติตั้งแต่ยอดเขาลงสู่ที่ราบจนจรดชายฝั่งทะเล ซึ่งป่าไม้เป็นแหล่งทรัพยากรที่เกื้อกูลการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่อดีตกาลโดยมนุษย์ได้อาศัยแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่อยู่รอบตัวมาใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภคและการเดินทาง การนำพืชพรรณชนิดต่างๆ มาใช้ ทั้งเพื่อการบริโภคเป็นอาหาร ยารักษาโรค เครื่องนุ่งห่ม และที่อยู่อาศัย ในปัจจุบันประชากรโลกเพิ่มขึ้น ความต้องการของมนุษย์มากขึ้นแต่ในทางตรงกันข้ามจะเห็นว่าทรัพยากรป่าไม้ลดลง ในปี พ.ศ. 2564 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ป่าทั้งหมดประมาณ 15,702,387.78 ไร่ เป็นพื้นที่ป่าชุมชนประมาณ 1,246,890 ไร่ จังหวัดเลยมีพื้นที่ป่าร้อยละ 32.18 ของพื้นที่ทั้งหมดของจังหวัด ซึ่งจัดว่าเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ป่ามากเป็นอันดับที่ 2 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รองมาจากจังหวัดมุกดาหาร (กรมป่าไม้ สำนักแผนงานและสารสนเทศ, 2564) สำหรับการศึกษาพืชในพื้นที่ป่าในจังหวัดเลยมีรายงานของ เทียมหทัย ชูพันธ์ และวิไลลักษณ์ ชุมสไตอินทร์ (2558) ศึกษาความหลากหลายของพรรณไม้ในวนอุทยานภูผาล้อม อำเภอนาด่าง จังหวัดเลย ที่ประกอบด้วยป่าดิบแล้งและป่าเต็งรัง ด้วยวิธีการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมขนาด 20×20 เมตร จำนวน 7 แปลง พบพรรณไม้ทั้งสิ้น 37 วงศ์ 57 สกุล 66 ชนิด บุญเลี้ยง สุพิมพ์ และคณะ (2566) รายงานความหลากหลายและการใช้ประโยชน์ทางยาจากพืชสมุนไพรในชุมชนบ้านสวนหอม ตำบลปวนพุก อำเภอนงหิน จังหวัดเลย พบ พืชสมุนไพรทั้งหมด 34 ชนิด 32 สกุล 27 วงศ์ พืชที่พบมากที่สุดคือวงศ์ Fabaceae-Caesalpinioideae

ป่าชุมชนผาดำตั้งอยู่ที่ตำบลนาดอกคำ อำเภอนาด่าง จังหวัดเลย ล้อมรอบด้วยชุมชนบ้านห้วยตาด บ้านใหม่สันติธรรม และบ้านโพนสว่าง ตำบลนาดอกคำ อำเภอนาด่าง จังหวัดเลย มีพื้นที่ประมาณ 200 ไร่ มีสภาพป่าเป็นป่าเต็งรัง ล้อมรอบไปด้วยภูเขาหินปูนสลับซับซ้อนมีหน้าผาสูง มีถ้ำขนาดใหญ่ และส่วนที่เหลือจะล้อมรอบด้วยพื้นที่ทำการเกษตรของชาวบ้าน ซึ่งส่วนใหญ่จะทำสวนผลไม้ สวนยางพารา ในพื้นที่ป่าชุมชนมีการตัดถนนลูกรังผ่านให้ผู้คนได้สัญจรในการเข้าไปทำการเกษตร และไปปฏิบัติธรรมที่สถานปฏิบัติธรรมวัดถ้ำผาดำสันติธรรม และวัดถ้ำผาขาม ในปี พ.ศ. 2562 ได้มีการพัฒนาให้วัดถ้ำผาดำเป็นสถานที่ท่องเที่ยวเชิงนิเวศ ควบคู่กับการอนุรักษ์ฟื้นฟูสภาพแวดล้อมโดยให้มีการพัฒนาถ้ำซึ่งมีขนาดใหญ่และภายในถ้ำได้แบ่งออกเป็นห้องเล็กๆ อีกกว่า 15 ห้อง บริเวณพื้นที่ภายนอกถ้ำได้เตรียมพื้นที่ไว้ในการสร้างศาลาการเปรียญที่มีต้นตะเคียนทองยืนต้นตายจำนวน 108 ต้น และพื้นที่ป่ามีประชาชนที่อยู่ล้อมรอบป่าได้มีการใช้ประโยชน์จากป่า คือ

มีการเก็บของป่า และยาสมุนไพร โดยหมอบ้านที่มีความรู้ทางด้านสมุนไพร เพื่อรักษาคนในชุมชน หรือในครอบครัวของตัวเอง และเก็บสมุนไพรไปขายเป็นอาชีพสร้างรายได้จากการพัฒนาทำถนนลูกรังผ่านป่า ซึ่งบริเวณล้อมรอบป่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตรของชาวบ้าน จึงทำให้มีการแผ้วถางป่าเพิ่มมากขึ้นและนอกจากนี้ชาวบ้านยังขบถยนต์หรือนำเครื่องมือการเกษตรผ่านป่าไปยังพื้นที่เกษตรของตัวเองจึงทำให้ป่าบางส่วนถูกทำลายโดยเฉพาะพืชพื้นล่างที่โดนเหยียบย่ำโดยเครื่องจักรและรถยนต์ ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าวิจัยจึงต้องการศึกษาความหลากหลายชนิดและดัชนีความสำคัญของพรรณไม้ เพื่อวิเคราะห์หาพรรณไม้ที่มีความสำคัญในสังคมป่าชุมชนผาดำ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถเป็นข้อมูลในการวางแผนการพัฒนาและแนวทางในการอนุรักษ์ป่าถ้ำผาดำต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาความหลากหลายของพรรณไม้ในพื้นที่ศึกษาป่าชุมชนผาดำ ตำบลนาดอกคำ อำเภอนาด่าง จังหวัดเลย มีลักษณะเป็นป่าเต็งรัง มีพื้นที่ประมาณ 200 ไร่ เป็นป่าชุมชนที่ชาวบ้านอาศัยอยู่รอบๆ เข้ามาใช้ประโยชน์ ในการศึกษาค้นคว้าใช้วิธีการสำรวจวางแปลงตัวอย่างเป็นระยะเวลา 1 ปี โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาตัวอย่างพรรณไม้โดยการสุ่มวางแปลงตัวอย่างตามวิธีการของ Krebs (1985) ด้วยการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมขนาด 20x20 เมตร จำนวน 14 แปลง เพื่อศึกษาพรรณไม้ต้นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (Diameter at Breast Height: DBH) ที่ระดับมากกว่า 130 เซนติเมตร จากพื้นดินและมีเส้นรอบวงมากกว่า 10 เซนติเมตรขึ้นไป และวางแปลงย่อยขนาด 5x5 เมตร ในแปลงตัวอย่างทั้ง 14 แปลง แปลงละ 1 แปลงย่อย เพื่อศึกษาพรรณไม้พื้นล่าง เช่น ไม้ล้มลุก ไม้เถา ไม้เลื้อย ลูกไม้ เก็บข้อมูลพรรณไม้ต้น ดังนี้คือชื่อพรรณไม้ ขนาดเส้นรอบวงของลำต้นที่ความสูง 130 เซนติเมตร ความสูงทั้งหมดของต้น จำนวนต้น และชนิดของพรรณไม้ที่พบในแปลงตัวอย่าง

2. เก็บตัวอย่าง และถ่ายภาพตัวอย่างพรรณไม้จากแปลงตัวอย่าง เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ตรวจสอบชื่อวงศ์ ชื่อวิทยาศาสตร์ และชื่อพื้นเมือง ด้วยหนังสือพรรณไม้แห่งประเทศไทย เช่น ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย (เต็ม สมิตินันท์, 2557) ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้ 1-3 (กองกานดาชยามฤต, 2548, 2550, 2551) พรรณพฤษชาติประเทศไทย หรือการสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญด้านพืช ตัวอย่างพรรณไม้แห้ง และตัวอย่างพรรณไม้ดอง เก็บรวบรวมไว้ที่สาขาวิชาชีววิทยาคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

3. วิเคราะห์ค่าดัชนีความสำคัญของพันธุ์ไม้ (Important Value Index: IVI) ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (Shannon-Wiener Index: H') โดยวิเคราะห์ความหลากหลายชนิดพันธุ์ (D) และดัชนีค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว (J) (ดอกรัก มารอด, 2554) โดยมีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

ค่าความหนาแน่น (density: D)

$$D = \frac{\text{จำนวนต้นทั้งหมดของพืชชนิดนั้นในแปลงตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่รวมของแปลงตัวอย่างที่ศึกษา}}$$

ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density: RD)

$$RD = \frac{\text{ความหนาแน่นของพืชชนิดนั้น}}{\text{ความหนาแน่นของพืชทุกชนิด}} \times 100$$

ค่าความถี่ (frequency: F)

$$F = \frac{\text{จำนวนแปลงตัวอย่างที่พืชชนิดนั้นปรากฏอยู่}}{\text{จำนวนแปลงตัวอย่างที่ทำการสำรวจ}}$$

ค่าความถี่สัมพัทธ์ (relative frequency; RF)

$$RF = \frac{\text{ความถี่ของพืชชนิดนั้น}}{\text{ผลรวมความถี่ของพืชทุกชนิด}} \times 100$$

ค่าความเด่น (dominance: Do) หรือความเด่นใน
ด้านพื้นที่หน้าตัด (basal area: BA)

$$BA = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของไม้ชนิดนั้นทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ที่ทำการสำรวจ}}$$

ค่าความเด่นสัมพัทธ์ (relative dominance: RD_o)

$$RD_o = \frac{\text{ความเด่นของไม้ชนิดนั้น}}{\text{ความเด่นรวมของไม้ทุกชนิด}}$$

ค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศวิทยาของพันธุ์ไม้ (important value index: IVI)

$$IVI = RD + RF + RD_o$$

ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (species diversity index: H')

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$$

โดย

H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้

p_i คือสัดส่วนระหว่างจำนวนต้นไม้ชนิด i ต่อจำนวนต้นไม้ทั้งหมด

S คือจำนวนชนิดพรรณไม้ทั้งหมด

ln p_i คือค่า log ฐานธรรมชาติของ p_i

ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว (evenness: J)

$$J = \frac{H'}{H_{max}}$$

เมื่อ

J คือดัชนีค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว

คือค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์

H_{max} คือค่าความหลากหลายของชนิด มีค่าสูงสุดเมื่อมีจำนวนชนิดเท่ากันซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$H_{max} = \ln S$$

เมื่อ

S = จำนวนชนิดของพืชชนิดนั้น ๆ

ค่าความหลากหลาย (Species diversity: D)

$$D = e^{H'}$$

โดย

D คือความหลากหลายชนิดพันธุ์

e = 2.71828 (ค่า log ฐานธรรมชาติ)

H' คือค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์

ผลการวิจัย

การศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพของพรรณไม้ในป่าชุมชนผาดำ อำเภอนาดวง จังหวัดเลย สภาพป่าที่ทำการศึกษเป็นป่าเต็งรัง ป่าโคก ที่ประชาชนใช้ประโยชน์ในการเก็บสมุนไพร เก็บเห็ด แมลง และพืชผักต่างๆ พบจำนวนชนิดพรรณไม้ทั้งหมด 29 วงศ์ 41 สกุล 45 ชนิด วงศ์ที่พบมากที่สุดคือวงศ์ Rubiaceae จำนวน 7 ชนิด รองลงมาคือวงศ์ Dipterocarpaceae จำนวน 4 ชนิด วงศ์ Asteraceae, Cyperaceae, Zingiberaceae และ Fabaceae จำนวนวงศ์ละ 3 ชนิด ส่วนวงศ์ Apocynaceae, Asparagaceae, Boraginaceae, Celastraceae Convolvulaceae, Costaceae, Hypericaceae, Irvingiaceae, Lamiaceae, Leeaceae, Lecythidaceae, Loganiaceae, Lygodaceae, Primulaceae, Ochnaceae, Poaceae, Sapindaceae, Santalaceae และวงศ์ Simaroubaceae พบเพียงวงศ์ และ 1 ชนิด

จำแนกพืชที่ทำการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ไม้ต้นพบจำนวน 13 วงศ์ 18 สกุล 21 ชนิด ไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญ (IVI) สูงสุดคือเต็ง (*Shorea obtusa* Wall. ex Blume) มีค่าเท่ากับ 150.160 ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (H') มีค่าเท่ากับ 3.034 ค่าความสม่ำเสมอใน

การกระจายตัว (J) มีค่าเท่ากับ 0.996 และค่าความหลากหลาย (D) ของชนิดพันธุ์ มีค่าเท่ากับ 7.454 กลุ่มที่ 2 ไม้พื้นล่างพบจำนวน 16 วงศ์ 23 สกุล 24 ชนิด ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (H') มีค่าเท่ากับ 2.645 ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว (J) มีค่าเท่ากับ 0.832 และค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (D) มีค่าเท่ากับ 7.531 (Table 1)

ไม้ต้นที่สำรวจพบมากที่สุดจากการวางแปลงตัวอย่างในพื้นที่ ได้แก่ เต็ง รองลงมาคือ เหียง (*Dipterocarpus obtusifolius* Teijsm.ex Miq.) และ รัง (*Shorea siamensis* Miq.) ตามลำดับ ไม้ต้นที่มีการกระจายตัวมากที่สุดคือ เต็ง

พบใน 7 แปลงตัวอย่าง พลวง (*Dipterocarpus tuberculatus* Roxb.) และตุมกา (*Strychnos nux-blanda* A.W.Hill) พบใน 5 แปลง และ 4 แปลงตัวอย่างตามลำดับ รองลงมาคือแดง (*Xylia xylocarpa* (Roxb.) Taub.) พลวง รัง ช้างน้ำ (*Ochna integerrima* (Lour.) Merr.) มะคังแดง (*Dioecrescis erythroclada* (Kurz) Tirveng.) และสีดาโคก (*Gardenia obtusifolia* Roxb. ex Hook.f.) พบใน 3 แปลงตัวอย่าง ส่วนกระบก (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W.Benn.) และยอป่า (*Morinda coreia* Buch.-Ham.) พบใน 2 แปลงตัวอย่าง

Table 1 Plants in Pha Dum community forest, Na Duang District, Loei Province

No.	Family	Scientific name	Local name	Group	(IVI)	pi ln pi
1	Apocynaceae	<i>Urceola polymorpha</i> (Pierre ex Spire) D.J.Middleton & Livsh.	Som lom	UC	6.329	-0.081
2	Asparagaceae	<i>Ophiopogon intermedius</i> var. <i>pauciflorus</i> Hook.f.	Faek hom	UC	8.881	-0.128
3	Asteraceae	<i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M.King & H.Rob.	Sap suea	UC	12.649	-0.217
4	Asteraceae	<i>Elephantopus scaber</i> L.	Do mai ru lom	UC	9.039	-0.132
5	Asteraceae	<i>Gymnanthemum extensum</i> (DC.) Steetz	Pa cha mong	UC	3.783	-0.075
6	Boraginaceae	<i>Heliotropium indicum</i> L.	Ya nguang chang	UC	3.228	-0.051
7	Celastraceae	<i>Salacia chinensis</i> L.	Kam phaeng chet chan	TC	9.632	-0.073
8	Convolvulaceae	<i>Camonea vitifolia</i> (Burm.f.) A.R.Simões & Staples	Chingcho	UC	2.936	-0.036
9	Costaceae	<i>Hellenia speciosa</i> (J.Koenig) S.R.Dutta	Ueang mai na	UC	5.622	-0.051
10	Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> L.	Ya hao mu	UC	10.068	-0.161
11	Cyperaceae	<i>Scleria levis</i> Retz.	Ya khom bang	UC	10.182	-0.131
12	Cyperaceae	<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	Ya nio nu	UC	13.881	-0.194
13	Dipterocarpaceae	<i>Shorea siamensis</i> Miq.	Rang	TC	32.937	-0.217
14	Dipterocarpaceae	<i>Dipterocarpus tuberculatus</i> Roxb.	Phluang	TC	26.411	-0.192
15	Dipterocarpaceae	<i>Shorea obtusa</i> Wall. ex Blume	Teng	TC	150.160	-0.248
16	Dipterocarpaceae	<i>Dipterocarpus obtusifolius</i> Teijsm.ex Miq	Hiang	TC	43.442	-0.261
17	Euphorbiaceae	<i>Croton oblongifolius</i> Roxb	Plao yai	TC	6.2589	-0.080
18	Fabaceae	<i>Mimosa pudica</i> L.	Maiyarap	UC	3.557	-0.066
19	Fabaceae	<i>Peltophorum dasyrrhachis</i> (Miq.) Kurz	A rang	TC	9.928	-0.073
20	Fabaceae	<i>Xylia xylocarpa</i> (Roxb.) Taub.	Daeng	TC	27.751	-0.277
21	Hypericaceae	<i>Cratoxylum cochinchinense</i> (Lour.) Blume	Tio kliang	TC	8.620	-0.122
22	Irvingiaceae	<i>Irvingia malayana</i> Oliv. ex A.W.Benn.	Krabok	TC	10.092	-0.128
23	Lamiaceae	<i>Rotheca serrata</i> (L.) Steane & Mabb.	Akhi thawan	UC	1.715	-0.035
24	Leeaceae	<i>Leea indica</i> (Burm.f) Merr.	Katang bai	UC	1.848	-0.042

Table 1 Plants in Pha Dum community forest, Na Duang District, Loei Province (cont.)

No.	Family	Scientific name	Local name	Group	(IVI)	pi ln pi
25	Lecythidaceae	<i>Careya arborea</i> Roxb	Kradon	TC	7.932	-0.292
26	Loganiaceae	<i>Strychnos nux-blanda</i> A.W.Hill	Tumka	TC	26.711	-0.099
27	Lygodaceae	<i>Lygodium polystachyum</i> Wall.ex T.Moore	Li phao	UC	4.487	-0.101
28	Primulaceae	<i>Ardisia polycephala</i> Wall. ex A.DC.	Tin cham	UC	3.268	-0.053
29	Myrtaceae	<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	Wa	TC	9.347	-0.073
30	Ochnaceae	<i>Ochna integerrima</i> (Lour.) Merr.	Chang nao	TC	16.927	-0.098
31	Poaceae	<i>Vietnamosasa pusilla</i> (A.Chev. & A.Camus) T.Q.Nguyen	Phek	UC	52.709	-0.297
32	Rutaceae	<i>Clausena wallichii</i> var. <i>guillauminii</i> (Yu.Tanaka) Molino	Song fa	UC	8.650	-0.155
33	Rubiaceae	<i>Ixora cibdela</i> Craib	Khem pa	UC	6.758	-0.049
34	Rubiaceae	<i>Paederia linearis</i> Hook.f.	Tot mu tot ma	UC	3.824	-0.119
35	Rubiaceae	<i>Dioecrescis erythroclada</i> (Kurz) Tirveng.	Ma khang daeng	TC	13.238	-0.094
36	Rubiaceae	<i>Gardenia sootepensis</i> Hutch.	Kham mok luang	TC	12.151	-0.122
37	Rubiaceae	<i>Gardenia obtusifolia</i> Roxb. ex Hook.f.	Si da khok	TC	16.950	-0.130
38	Rubiaceae	<i>Morinda coreia</i> Buch.-Ham.	Yo pa	TC	12.896	-0.109
39	Rubiaceae	<i>Mitragyna hirsuta</i> Havil	Kra thum khok	TC	12.558	-0.207
40	Sapindaceae	<i>Lepisanthes rubiginosa</i> (Roxb.) Leenh.	Ma huat	TC	2.639	-0.07
41	Santalaceae	<i>Scleropyrum pentandrum</i> (Dennst.) Mabb.	Mueat khon	TC	4.095	-0.060
42	Simaroubaceae	<i>Harrisonia perforata</i> (Blanco) Merr.	Khontha	UC	2.507	-0.071
43	Zingiberaceae	<i>Kaempferia marginata</i> Carey ex Roscoe	Wan toop moop	UC	11.876	-0.202
44	Zingiberaceae	<i>Curcuma angustifolia</i> Roxb	Krachiao daeng	UC	8.514	-0.116
45	Zingiberaceae	<i>Curcuma parviflora</i> Wall.	Krachiao khao	UC	3.697	-0.071
Species diversity index (H') UC						2.645
TC						3.034
Evenness (J) UC						0.832
TC						0.996
Diversity (D) UC						7.531
TC						7.454

หมายเหตุ : Group : กลุ่มพืชที่ศึกษา

TC (Tree categories) : ไม้ต้น, UC (Understory categories) : ไม้พื้นล่าง

และอีก 10 ชนิดที่พบในแปลงตัวอย่างจำนวน 1 แปลง ไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด ได้แก่ เต็ง มีค่าเท่ากับ 150.160 รองลงมา คือ พลวงและรัง มีค่าเท่ากับ 43.442 และ 32.937 ตามลำดับ การกระจายตัวของไม้พื้นล่างที่มากที่สุด จำนวน 7 แปลง คือ หญ้าหน้าหนู (*Fimbristylis dichotoma* (L.) Vahl) รองลงมาพบจำนวน 6 แปลง ได้แก่ เพ็ก (*Vietnamosasa pusilla* (A.Chev. & A.Camus) T.Q.Nguyen) และหญ้าคอบาง (*Scleria levis* Retz.) พบจำนวน 5 แปลง ได้แก่ เข็มป่า (*Ixora cibdela* Craib) ไม้ไม่รู้ลืม (*Elephantopus scaber* L.) สาบเสือ

(*Chromolaena odorata* (L.) R.M.King & H.Rob.) ว่านตูปหมูป (*Kaempferia marginata* Carey ex Roscoe) กระเจียวแดง (*Curcuma angustifolia* Roxb) ผักหอม (*Ophiopogon intermedius* var. *pauciflorus* Hook.f.) และ หญ้าหัวหมู (*Cyperus rotundus* L.) พบจำนวน 4 แปลง คือ ส่องฟ้า (*Clausena wallichii* var. *guillauminii* (Yu.Tanaka) Molino) ส้มลม (*Urceola polymorpha* (Pierre ex Spire) D.J.Middleton & Livsh.) และเอื้องหมายนา (*Hellenia speciosa* (J.Koenig) S.R.Dutta) พบใน 2 แปลง คือ ตีนจ่า (*Ardisia polycephala*

Wall. ex A.D.C.) ไมยราบ (*Mimosa pudica* L.) กระเจียวขาว (*Curcuma parviflora* Wall.) หญ้าวงช้าง (*Heliotropium indicum* L.) ป่าช้าหอม (*Gymnanthemum extensum* (DC.) Steetz) ลิเกา (*Lygodium polystachyum* Wall. ex T. Moore) พบเพียง 1 แปลง ได้แก่ จิงจ้อ (*Camonea vitifolia* (Burm.f.) A.R. Simões & Staples) อัครีทวาร (*Rotheca serrata* (L.) Steane & Mabb.) กระตังใบ (*Leea indica* (Burm.f.) Merr.) ไม้พื้นล่างที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด คือ เพ็ก มีค่าเท่ากับ 52.709 และไม้พื้นล่างที่สำรวจพบมากที่สุดจากการวางแปลง ตัวอย่าง ได้แก่ เพ็ก รองลงมาคือ หญ้านิวหนุ และสาบเสือ

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการสำรวจความหลากหลายของพรรณไม้ในเขตพื้นที่ป่าชุมชนผาดำ อำเภอหาดวัง จังหวัดเลย พบทั้งหมด 29 วงศ์ 41 สกุล 45 ชนิด จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ต้นและไม้พื้นล่าง เท่ากับ 3.034 และ 2.645 ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว เท่ากับ 0.996 และ 0.832 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ของค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ที่มีค่าระหว่าง 1-5 และค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัวที่มีค่าระหว่าง 0-1 (เทียบมหาย ชูพันธ์, 2562b) และมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาไม้ต้นและไม้พื้นล่างของเทียบมหาย ชูพันธ์ และ วิไลลักษณ์ ชุมสไตอินน์ (2557) ในวนอุทยานภูผาล้อม อำเภอหาดวัง จังหวัดเลย ที่มีค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ เท่ากับ 2.8841 และ 2.0071 และค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว คือ 0.7372 และ 0.7084 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่วนอุทยานภูผาล้อมมีลักษณะป่าส่วนมากเป็นป่าดิบแล้งล้อมรอบไปด้วยหุบเขาหินปูนสลับซับซ้อนต้นไม้สูงที่บั้นในหุบเขาและบางส่วนเป็นป่าเต็งรังแต่เป็นส่วนน้อยของพื้นที่จึงอาจทำให้มีผลการศึกษาที่แตกต่างกันกับการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้ผลการศึกษานี้ยังมีค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ต้นและไม้พื้นล่างมีค่ามากกว่าการศึกษาของเทียบมหาย ชูพันธ์ (2562a) ที่ทำการศึกษาคความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมาได้รายงานค่าดัชนีความหลากหลายของชนิดพันธุ์ของไม้ต้นและไม้พื้นล่าง เท่ากับ 2.5183 และ 2.3571 ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว เท่ากับ 0.6974 และ 0.7152 ตามลำดับ และรายงานของเทียบมหาย ชูพันธ์ (2564) ในการศึกษาพรรณพืชในป่าชุมชนภูประตู่เฉลิมพระเกียรติ อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา ความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ต้นมีค่าเท่ากับ 2.9191 และไม้พื้นล่าง มีค่าเท่ากับ 2.4537 ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายตัว มีค่าเท่ากับ 0.6108 และ 0.4627 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพรรณไม้ต้นในป่าชุมชนผาดำ มีค่าดัชนีความสำคัญ (IVI) สูงสุดคือ เต็ง มีค่าเท่ากับ 150.160

รองลงมาคือ เหียงและรัง มีค่าเท่ากับ 43.442 และ 32.937 ตามลำดับ แสดงว่า เต็งและเหียงเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศในป่าชุมชนผาดำ ส่วนไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญน้อยสุดคือ เหม็ดคน และมะหวด มีค่าเท่ากับ 4.095 และ 2.639 ตามลำดับ พรรณไม้เหล่านี้ควรอนุรักษ์ไว้เพราะเป็นพืชที่พบน้อยในสังคมป่าชุมชนผาดำ ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มว่าจะสูญพันธุ์ได้ การวิเคราะห์ความหลากหลายชนิดของพรรณไม้ พบว่าไม้ต้นมีค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ (H') เท่ากับ 3.034 ซึ่งมากกว่าไม้พื้นล่างที่มีค่าเท่ากับ 2.645 แสดงว่าสังคมป่าชุมชนผาดำในปัจจุบันมีค่าความอุดมสมบูรณ์ของพรรณไม้ใหญ่มากกว่าพรรณไม้พื้นล่าง (สมหญิง แก้วบุ๋ม และคณะ, 2552)

การศึกษาพรรณไม้ในป่าชุมชนผาดำครั้งนี้พบพืชทั้งหมด 29 วงศ์ 41 สกุล 45 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของบุญเลี้ยง สุพิมพ์และคณะ (2566) ศึกษาความหลากหลายและการใช้ประโยชน์ทางยาจากพืชสมุนไพรในชุมชนบ้านสวนหอม ตำบลปวนพ อำเภอหนองหิน จังหวัดเลย พบ 34 ชนิด 32 สกุล 27 วงศ์ รายงานของเทียบมหาย ชูพันธ์ และ วิไลลักษณ์ ชุมสไตอินน์ (2557) ศึกษาในเขตวนอุทยานภูผาล้อม อำเภอหาดวัง จังหวัดเลย พบ 37 วงศ์ 57 สกุล 66 ชนิด เทียบมหาย ชูพันธ์ (2564) ในป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมาพบ 51 ชนิด รายงานของเอี่ยมพร จันทร์สองดวงและคณะ (2561) ศึกษาในเขตป่าชุมชนโคกกุง ตำบลเกาะแก้ว อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ดพบ 35 วงศ์ 59 สกุล 79 ชนิด และรายงานของเอี่ยมพร จันทร์สองดวงและคณะ (2563) ศึกษาความหลากหลายระดับชนิดของพืชสมุนไพรในอำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ดพบทั้งหมด 49 วงศ์ 74 สกุล 81 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องจากการศึกษาในพื้นที่ที่แตกต่างกัน วิธีการศึกษา การวางแปลง จำนวนแปลง และลักษณะนิเวศวิทยาของป่าที่แตกต่างกันจึงทำให้จำนวนพืชที่พบแตกต่างกันไปตามพื้นที่ แต่ชนิดพืชที่พบไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากป่าที่ทำการศึกษามีลักษณะเป็นป่าเต็งรังคล้ายกัน การศึกษาพืชสมุนไพรและการใช้ประโยชน์ของพืชในรายงานของเอี่ยมพร จันทร์สองดวงและคณะ (2561, 2563) กฤตวิชัย สุขอึ้ง และคณะ (2562) สุทาร์ตน์ คนขยัน และคณะ (2562) ศรีัญญา ก่อพันธ์ และคณะ (2562) สุรชาติ สินวรรณ และคณะ (2557) และ บุญเลี้ยง สุพิมพ์ และคณะ (2566) จะเห็นว่ามีชนิดพืชที่เหมือนกับการศึกษาที่ป่าชุมชนผาดำในครั้งนี้จำนวน 34 ชนิด เช่น กระโดน โดไม่รู้ล้ม เอื้องหมายนา สาบเสือ ป่าช้าหอม คำมอกหลวง ที่มีสรรพคุณทางยาสมุนไพร จึงจะเห็นว่าป่าชุมชนผาดำเป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่หมอชาวบ้านได้เก็บสมุนไพรไปใช้หรือขาย และในการศึกษานี้ยังพบพรรณไม้หายากตามบัญชีพืชหายากในประเทศไทยได้แก่ คำมอกหลวง (*Gardenia sootepensis* Hutch.) (ราชันย์ ภูมา, 2551) และพืชหายาก

ของโลก (Rare) จำนวน 1 ชนิด คือเหมือดคน (*Scleropyrum pentandrum* (Dennst.) Mabb.) (Forest Herbarium, 2017) ซึ่งพบพืชทั้งสองชนิดนี้ในพื้นที่การศึกษาเพียง 1 แปลงเท่านั้น เอื้อมพร จันทรสองดวง และคณะ (2561) รายงานว่า ค้ำมอกหลวงมีสรรพคุณทางสมุนไพรคือใช้สำหรับหญิงหลังคลอดบุตร ส่วนเหมือดคนมีสรรพคุณทางสมุนไพรดังนี้ ลำต้นใช้ในการบำรุงกำลัง แก่นใช้เป็นยาบำรุงน้ำนม ใบใช้รักษาผิวหนัง ผลใช้ฟอกเลือด (คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2565) จากข้อมูลดังกล่าวอาจทำให้พืชทั้งสองชนิดในป่าชุมชนผาดำหมดไป จึงควรมีการประชาสัมพันธ์ให้

ชุมชนที่อาศัยอยู่รอบๆ และผู้ที่มาใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนผาดำได้ทราบและเห็นความสำคัญของพืชทั้งสองชนิดนี้ เพื่อจะได้วางแผนในการอนุรักษ์ต่อไป

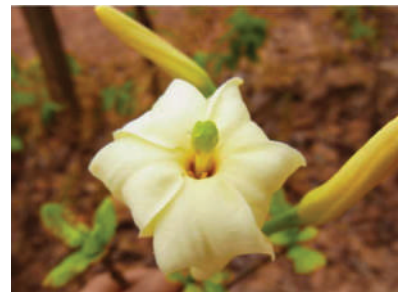
พื้นที่ป่าชุมชนผาดำลักษณะป่าเป็นป่าเต็งรัง ล้อมรอบด้วยพื้นที่การเกษตรของชาวบ้าน มีสถานที่ปฏิบัติธรรมและวัด ในพื้นที่ป่า นอกจากนี้ยังได้รับงบประมาณสนับสนุนให้วัดถ้ำผาดำเป็นสถานที่ท่องเที่ยวเชิงนิเวศ ควบคู่กับการอนุรักษ์ฟื้นฟูสภาพแวดล้อม ป่าชุมชนผาดำเป็นพื้นที่หลักของชาวบ้านที่



(a) *Croton oblongifolius*



(b) *Cheilocostus speciosus*



(c) *Gardenia obtusifolia*



(d) *Mitragyna hirsuta*



(e) *Harrisonia perforata*



(f) *Salacia chinensis*



(g) *Ochna integerrima*



(h) *Kaempferia marginata*



(i) *Rothea serrata*



(j) *Clausena wallichii* var. *guillauminii*



(k) *Dioecrescis erythroclada*



(l) *Urceola polymorpha*

Figure 1 Some species of plants in Pha Dum community forest.

อาศัยโดยรอบ และชาวบ้านที่อาศัยตามหมู่บ้านห่างไกลออกไปได้เดินทางมาหาอาหาร เช่น แมลงจิ้งจกจิ้งระยะตัว เต็มวัย และระยะที่เป็นไข่ เห็ด ผัก สมุนไพรและไม้พืชน้ำที่ใช้ในครัวเรือน บริเวณกลางป่ามีการตัดถนนผ่านป่า ชาวบ้านจึงสามารถใช้เป็นทางลัดในการสัญจรจากหมู่บ้านหนึ่งไปยังอีกหมู่บ้านหนึ่ง และทำให้ชาวบ้านสามารถนารถยนต์ รถมอเตอร์ไซด์ และรถแทรกเตอร์ หรือเครื่องมือหนักในการทำการเกษตรผ่านป่าชุมชนนี้ได้จึงทำให้มีการแผ้วถางป่าได้โดยง่าย ป่าโดนทำลาย โดยเฉพาะลูกไม้และพืชพื้นล่าง จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้พบพืชแตกต่างจากพื้นที่ศึกษาอื่นๆ จากที่กล่าวมาจึงเห็นว่าพื้นที่ป่าแห่งนี้ควรได้รับการจัดการอนุรักษ์ที่ถูกต้อง และให้ชุมชนที่อาศัยอยู่รอบป่ามีส่วนร่วมในการดูแลรักษาทรัพยากรธรรมชาติ เพื่อจะได้ใช้ประโยชน์จากป่าแห่งนี้ได้อย่างยั่งยืนสืบไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเลยที่สนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนวิจัย ปีงบประมาณ 2562 และขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- กรมป่าไม้ สำนักแผนงานและสารสนเทศ. (2564). *ข้อมูลสถิติกรมป่าไม้*. [https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stat2564/Binder%2064\(1\).pdf](https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stat2564/Binder%2064(1).pdf).
- กองกานดา ชยามฤต. (2548). *ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้*. สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- กองกานดา ชยามฤต. (2550). *ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้ 2*. สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- กองกานดา ชยามฤต. (2551). *ลักษณะประจำวงศ์พรรณไม้ 3*. สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- กฤตวิษณุ สุขอึ้ง, พรรณีภา วงศ์ชัย และจุฬาลักษณ์ ลาเกิด. (2562). การศึกษาแหล่งพืชสมุนไพรในป่าพรุน้ำจืดของอุทยานแห่งชาติภูซาง จังหวัดพะเยา. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 10(2), 263-271.
- คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. (2565). *ฐานข้อมูลยาและสมุนไพร*. <https://phar.ubu.ac.th/main/database>.
- ดอกกรัก มารอด. (2554). *เทคนิคการสู่มตัวอย่างและการวิเคราะห์สังคัมพืช*. คณะวนศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เต็ม สมิตินันท์. (2557). *ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย (Thai Plant Names) ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2557 (พิมพ์ครั้งที่ 2). ประชาชนจำกัด*.
- เทียมหทัย ชูพันธ์. (2562a). ความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา. *วารสารวิทยาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี*, 1(1), 1-10.
- เทียมหทัย ชูพันธ์. (2562b). พืชมีท่อลำเลียงในวนอุทยานไม้กลายเป็นหิน อำเภอบ้านตาก จังหวัดตาก. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 24(1), 170-189.
- เทียมหทัย ชูพันธ์. (2564). พรรณพืชในป่าชุมชนภูประดู่เฉลิมพระเกียรติ อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*, 47(4), 673-690.
- เทียมหทัย ชูพันธ์ และ วิไลลักษณ์ ชุมสไตอินทร์. (2557). ความหลากหลายของพรรณไม้ในวนอุทยานภูผาล้อม อำเภอนาดวง จังหวัดเลย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 34(4), 226-341.
- บุญเลี้ยง สุพิมพ์, นรวรรณ อยู่สำราญ, ปิยะพงษ์ ชุมศรี, มรุสชา มาตย์ และ อรทัย ปานเพชร. (2566). *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 28(1), 1-19.
- ราชันย์ ภูมา. (2551). *พืชหายากของประเทศไทย*. สำนักงานหอพรรณไม้ สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้พันธุ์พืชกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- ศรีบุญญา ก่อพันธ์, ธวัชชัย ธานี และสมบัติ อัมระภา. (2562). ความหลากหลายชนิดและการใช้ประโยชน์ของพืชสมุนไพรของกลุ่มชาติพันธุ์กุ่มในพื้นที่ป่าชุมชนโคกคูขาด บ้านคูสีแจ อำเภอไพรบึง จังหวัดศรีสะเกษ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 38(3), 247-262.
- สมหญิง ภูแก้ว, เพ็ญแข ธรรมเสนานุกภาพ และ ธวัชชัย ธานี. (2552). ความหลากหลายชนิดของพรรณไม้และการใช้ผลผลิตจากป่า ในป่าชุมชนโคกใหญ่ อำเภอวาปีปทุม จังหวัดมหาสารคาม. *วารสารสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ*, 7(1), 36-50.
- สุทาร์ตน์ คนขยัน, แววดา แสงศิริ และหัตถุญา ทิพย์สนเทห์. (2562). พืชสมุนไพรในภูแม่นางมอน เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูสีฐาน จังหวัดมุกดาหาร. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 24(2), 500-516.
- สุรชาติ สินวรรณ และณัฐบดี วิริยวัฒน์. (2557). ความหลากหลายของสมุนไพรและการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เขาพระอำเภอดงหลวงนางบวช จังหวัดสุพรรณบุรี. *วารสารวิจัยมสธ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 7(1), 1-19.

เอี่ยมพร จันทร์สองดวง ดาริกา โพธิ์ศรี และอรอนงค์ น่วมบัณฑิต.
(2561). ความหลากหลายทางชีวภาพระดับชนิดและการใช้ประโยชน์ของไม้ต้นในเขตป่าชุมชนโคกกุง ตำบลเกาะแก้ว อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 6(1), 1-16.

เอี่ยมพร จันทร์สองดวง, กัญญาพัชร ทะนะเวช, สุวรรณาลำไย, วิภาพร หลวงเทพ, มาลีตา คำมณี และนธกร ไชยธรรม. (2563). ความหลากหลายระดับชนิดของพืชสมุนไพรในอำเภอสวรรภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี*, 1(2), 1-26.

Forest Herbarium. (2017). *Threatened plants in Thailand*. Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation.

Krebs, C. J. (1985). *Ecology : The Experimental Analysis of Distribution and Abundance* (3rd ed). New York: Harper and Row.

การอนุรักษ์ในรูปแบบดิจิทัลของแหล่งซากดึกดำบรรพ์รอยตีนไดโนเสาร์แห่งแรกของประเทศไทยโดยใช้เทคนิคโฟโตแกรมเมตรีสำหรับแบบจำลอง 3 มิติ

Digital conservation of the first dinosaur tracksite of Thailand using photogrammetry for 3D modeling

คงกระพัน ไชยทองศรี¹ และ สุรวещ สุธีธร²
Kongkrapan Chaitongsri¹ and Suravech Suteethorn^{2*}

Received: 27 September 2023 ; Revised: 14 September 2023 ; Accepted: 20 November 2023

บทคัดย่อ

ซากดึกดำบรรพ์รอยตีนไดโนเสาร์ที่มีการบันทึกไว้ครั้งแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2527 รอยดังกล่าวถูกพบอยู่บริเวณผาสมเด็จในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย บริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นหินทรายจากหมวดหินภูพานของยุคครีเทเชียสตอนต้น และเป็นรอยตีนที่พบเพียงแหล่งเดียวจากยุคนี้ อย่างไรก็ตามบริเวณเส้นทางภูหลวงมีความเสี่ยงที่จะเสื่อมสภาพตามกาลเวลาเนื่องจากสภาพอากาศ สัตว์ และกิจกรรมของมนุษย์ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามแผนการอนุรักษ์ในรูปแบบดิจิทัลโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติที่สร้างจากเทคนิคโฟโตแกรมเมตรี แบบจำลองสามมิติที่ได้จากวิธีนี้สามารถเก็บข้อมูลพื้นผิว สี และแสดงผลลักษณะของตัวอย่างในช่วงเวลานั้นได้ให้ผลที่ดีกว่าและง่ายต่อการนำมาใช้งานเมื่อเทียบกับวิธีการเดิม เช่น การทำพิมพ์รอยตีน แบบจำลองเหล่านี้ให้ข้อมูลรายละเอียดเพื่อการอนุรักษ์และส่งเสริมการสื่อสาร การทำงานร่วมกันทางวิทยาศาสตร์ การใช้โฟโตแกรมเมตรีช่วยให้การผลิตข้อมูลรวดเร็วและคุ้มค่า เป็นประโยชน์ต่อผู้เชี่ยวชาญและสาธารณชนในการอนุรักษ์และเผยแพร่ความรู้

คำสำคัญ: หมวดหินภูพาน, กลุ่มหินโคราช, ยุคครีเทเชียสตอนต้น, แบบจำลองสามมิติ, รอยตีนไดโนเสาร์

Abstract

The first documented dinosaur footprints in Southeast Asia were discovered in 1984. The footprint site is located on the Somdet cliff overlying Phu Luang hill in the Phu Luang Wildlife Sanctuary, Loei Province, Northeastern Thailand. The tracksite is imprinted on a sandstone bed of the Phu Phan Formation, Lower Cretaceous. It is the only footprint track discovered from this stage in Thailand. However, the Phu Luang tracksite is at risk of deterioration due to climate, animal, and human activities. This study aims to monitor a digital conservation plan for this tracksite using 3D models generated through digital photogrammetry. This method's 3D model output can capture texture and color, and can represent the properties of the specimen at the time. When compared to older processes such as cast and mold footprint, it produces better results and is easier to use. These models provide informative data in detail for conservation and enhance scientific communication and collaboration. By adopting photogrammetry, data production becomes rapid and cost-effective, benefiting specialists and the public for conservation and knowledge dissemination.

Keywords: Phu Phan formation, Korat group, early cretaceous, 3D model, dinosaur footprints

¹ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, เบอร์โทรศัพท์ 0954261906

² ศูนย์วิจัยและการศึกษามหาสารคาม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University

² Palaeontological Research and Education Centre, Mahasarakham University

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

Introduction

The discovery of dinosaur footprints in Southeast Asia started in 1884. Thailand has a rich history of dinosaur discoveries, including several dinosaur tracksites found in different localities, and these remarkable findings were among the first documented fossil vertebrate footprints in Southeast Asia. (Buffetaut *et al.* 1985a). This first dinosaur tracksite was reported to have fifteen footprints embedded on a sandstone bed of the Phu Phan Formation, located at the Somdet cliff in the Phu Luang Wildlife Sanctuary of Loei Province (Lat 17.293520177762456N, Long 101.52982315394472E), northeastern Thailand (Figure 1).

The footprint maker was attributed to a large theropod with a footprint length of approximately 35 cm. The Phu Phan Formation is part of the Khorat Group and dates back to the Early Cretaceous period (Buffetaut *et al.* 1985b; Le Loeuff *et al.*, 2005, 2006; Lockley *et al.* 2002, 2006;).

Forty years later, it is worth noting this area is the part of the nature trail and viewpoint of Somdet cliff, and that the Phu Luang tracksite faces significant risks of deterioration. Factors such as the region's humid subtropical climate, wild animals, and human activities threaten the preservation of these prehistoric footprints. Without proper conservation efforts, there is a potential for erosion and degradation of the footprints over time. (Figure 2).

To address these risks and protect the valuable dinosaur footprints, researchers propose a conservation plan (Site Monitoring and Maintenance, Visitor Education, Scientific Research, Documentation and Record-Keeping, Community Engagement, Emergency Response Plan, and Collaboration) based on a digital plan. This plan uses 3D models generated through the digital photogrammetry technique (Albertz, 2007; Mallison and Wings, 2014), providing detailed and accurate morphological information of the tracksite (e.g., Lyons *et al.*, 2000; Falkingham, 2012; Cunningham, 2014; Petti *et al.*, 2018; Martinez *et al.*, 2020). These digital models offer promising avenues for virtual documentation, exhibition, and preservation of the dinosaur tracks, which are susceptible to weathering.

Materials and Methods

Photogrammetry

A field survey was conducted to generate digital surface models of the dinosaur tracksite using photogrammetry. A Canon PowerShot G7 X Mark II digital compact camera with a resolution of 20.1 megapixels was utilized for this purpose. The camera's focal length (35 mm film equivalent) could be adjusted from 8.8 to 36.8 mm (24-100 mm). Data acquisition involved capturing 395 images divided into photosets from various viewpoints with overlapping patterns of 60 to 80 percentage. 21 calibration markers (Physical target point print-out from Metashape) were placed near the footprints to scale the 3D models. The images were taken manually while walking around the tracksite, with each photo captured at a distance equivalent to one walking step (0.5 to 1 m). The photography session took place between 1 p.m. and 3 p.m. in January 2022 to ensure adequate sunlight. Camera settings included dimensions of 4864 x 3648, 180 dpi x 180 dpi resolution, F/11 aperture, ISO speed of 125, focal length of 9 mm, white balance set to auto, no flash, and the export format set to JPG.

Data processing

Data processing was performed on a PC with an Intel® Core(TM) i7-6700 processor operating at 3.40 GHz, 64.0 GB RAM, and Windows 10 as the operating system. The software used for creating 3D models was Agisoft Metashape Professional Edition Version 1.7.1, following the procedure established by Mallison & Wings (2014); Falkingham *et al.* (2018) and Lallensack *et al.* (2022). This software enables the derivation of three-dimensional models, point clouds, digital elevation models (DEMs), and their integration with GIS products. The data analysis and derivation process in this study consisted of the following steps: 1) adding photos, 2) aligning photos, 3) creating mesh and texture, 4) generating DEM, and 5) exporting the model.

Twenty-one markers were set on the tracksite to scale and orientate the 3D model accurately. These markers were placed on the sandstone bed. The accuracy of the scale was set at 0.01 m center radial in the black circle. Additionally, these markers were placed on the ground level at similar altitudes to orient the surface

perpendicularly to the Z axis and produce a Digital Elevation Model (DEM). These ground-level markers were assigned to position the entire model perpendicular to the surface, use the Z coordinate value of 0.

Results

The field survey capturing 395 images (Figure 3), covered an area of about 13.75 m². The images were interpolated and processed with high-quality accuracy to generate a sparse point cloud consisting of at least 128,000 points. The processing time for this step was approximately 5 hours. A dense point cloud was created from the sparse point cloud, comprising 3.4 million points. Subsequently, a mesh with at least 1.8 million faces was generated, and a texture was applied to the 3D models. The 3D models were exported as OBJ files, while the texture and contour lines were saved as JPEG files. Additionally, the Digital Elevation Model (DEM) was exported as a TIFF file. Using photogrammetric techniques resulted in the acquisition of high-resolution digital data, encompassing digital surface models and ground resolutions. A summary of these outcomes is presented in Table 1.

Table 1 Technical parameters of a 3D model on the Phu Luang tracksite

Method	Photogrammetry
Software	Agisoft Metashape
Number of Images	395.
Height from the ground (m)	1
Collecting duration (min)	30
Processing time	5 hrs.
Area (sq m)	13.75
DEM resolution (pixel)	9,038 x 15,447

The application of photogrammetry in ichnological studies is becoming more common, as demonstrated by the Phu Luang dinosaur tracksite surveys. Photogrammetry has enabled the production of high-resolution images, allowing for rapid data acquisition for each investigated track. The images can be thoroughly examined using software that allows users to tilt and zoom into the 3D

model, facilitating track observation, analysis, and measurements. This method eliminates errors caused by original atmospheric and lighting conditions, as users can adjust and orient lighting specifically for each track. The photogrammetry provides an opportunity to study footprints with high accuracy and ideal lighting conditions, surpassing the limitations of field studies.

Discussion

In the case of the Phu Luang tracksite (Figure 4), the 3D model shows all detail of the 15 tridactyl large-sized tracks. The 3D model, similar to the sketch shown in Figure 4, reveals all the intricate details. Within the model, even subtle variations in morphology become evident due to factors such as overlapping impressions, individual foot structure differences, and varying degrees of weathering. Additionally, some areas, such as points a and b, within the 3D model exhibit footprints, even though they have not been explicitly mentioned before. This approach not only provides data but also unveils textures and details that might be challenging to discern with the naked eye. A prime example can be seen in locations a and b in Figure 4, where what appears to be dinosaur tracks become more evident upon closer inspection. Photogrammetry has proven ideal for capturing a detailed photographic footprint area, creating a comprehensive map and georeferenced visualization of the dinosaur tracks on the ground. The 3D models derived from point cloud processing accurately reproduce the trackways, enabling precise measurements. The 3D models provide detailed representations of the trackways; the models can be examined closely, zoom in, rotate, and tilt for different perspectives, enabling precise measurements of the footprints' length, width, depth, and orientation (Figure 5). The 3D model exhibits an impressive level of detail that is on par with the photographs. The key distinction lies in the 3D model's versatility — it can be rotated, adjusted, and zoomed in or out to provide different perspectives. Moreover, owing to the image resolution utilized during its generation, the solid model allows for the examination of surface details without the influence of lighting and shadow artifacts.

This non-invasive approach allows accurate data collection without risking damage to the fragile fossils,

ensuring repeatability for consistent scientific research and facilitating comparisons between studies. Photogrammetry enables the generation of various products, including 3D models and videos, which researchers can use for remote inspections of the site and conservation and dissemination purposes.

Photogrammetry offers reliable and high-resolution images, which are portable, have reduced costs and faster execution. The long-term conservation of paleontological remains a topic of debate, and despite various attempts to document and restore dinosaur tracksites, the management and conservation of these sites continue to present challenges.

Replica methods: Digital vs Manual

In the paleontological field, replica processes for dinosaur footprints and other fossils are frequently used. When choosing a replication method, it is necessary to consider the intended use of the replicas, as well as the available resources, for studying and displaying fossils while preserving the original specimens. Each method has advantages and disadvantages, and the choice is typically influenced by the specific requirements of the project. In this study, the efficacy of photogrammetry and silicone mold techniques for replicating dinosaur footprint specimens was assessed, as detailed in Table 2 (Kozu, 2017).

Table 2 The comparison of Photogrammetry and Silicone Mold for Dinosaur Footprint

Method	Photogrammetry	Silicone mold
Type	Digital	Physical
Procedure time	1 hr.	72 hrs.
Field staff	1	2
Invasive	No	Yes
Damage	No	Yes
Portable	Yes	No
Usability	Easy	Hard

Photogrammetry stands out for its digital preservation and interaction with other technologies, as well as its non-invasive precision, distant data collecting

capabilities, and adaptation to varied surfaces. Potential disadvantages include reliance on lighting conditions and a learning curve for equipment use. The silicone mold, provides tangible copies suited for hands-on education and museum displays, but it is an invasive process, labor-intensive, and confined to physical replicas. The intended purpose, preservation issues, and financial considerations are all factors to consider when deciding between approaches. As technology advances, an intelligent choice of replication methods will influence the future of paleontological study and teaching by balancing precision, accessibility, and affordability.

When comparing 3D scanning for dinosaur footprint 3D modeling, photogrammetry emerges as a highly advantageous method. (Jansa *et al.*, 2004) Its accessibility, cost-effectiveness, and minimal equipment requirements make it an appealing option for researchers. Photogrammetry’s versatility in handling various subject sizes, large-scale capabilities, and adaptability to fieldwork contribute to its broad applicability in paleontology. The user-friendly software, community support, and educational value further enhance its standing. While both methods have strengths, the numerous pros of photogrammetry, including its non-invasiveness and low impact on specimens, position it as a preferred choice for creating accurate and detailed 3D models of dinosaur footprints, fostering a balance between precision, accessibility, and practicality in the field of paleontological. (e.g., Cunningham *et al.*, 2014; Chatzi *et al.*, 2017).

Conservation plan

The long-term protection and preservation plan of these paleontological sites, the conservation strategy for the dinosaur footprints at the Phu Luang tracksite is essential. The main methods that enable a conservation strategy to protect dinosaur footprints are as follows.

- 1) Site Monitoring and Maintenance consistent site monitoring is necessary to detect any risks or modifications. Cleaning, fixing, and stabilizing the imprints are all examples of maintenance procedures that can be used to stop erosion, weathering, or other types of damage.
- 2) Visitor Education. It is essential to inform visitors of the significance of the place and its

preservation. Visitor centers, narrated tours, and interpretive signage can all aid in promoting awareness and appropriate behavior.

3) Scientific Research. Scientific study can be encouraged at the site in order to better understand the footprints while complying with conservation guidelines. To limit their impact, researchers should adhere to tight guidelines.

4) Documentation and Record-Keeping. Meticulous records should be kept, photographs, and 3D models of the footprints to document their current state. This provides as a starting point for tracking changes throughout time.

5) Community Engagement. Involve local people in conservation efforts, as they frequently play an important role in conserving and valuing cultural heritage assets.

6) Emergency Response Plan. Develop an emergency response plan to deal with unexpected risks such as natural disasters, vandalism, or illegal excavation. This plan should include rapid protection and recovery techniques.

7) Collaboration. Collaborate with paleontologists, conservationists, government agencies, and local stakeholders to ensure that the footprints are preserved in a coordinated manner.

A successful conservation strategy for dinosaur footprints must take a holistic approach that combines safeguards, awareness-raising, study, and continual observation. We can assure the survival of these priceless scientific and cultural riches for future generations to study and admire by putting these plans into practice.

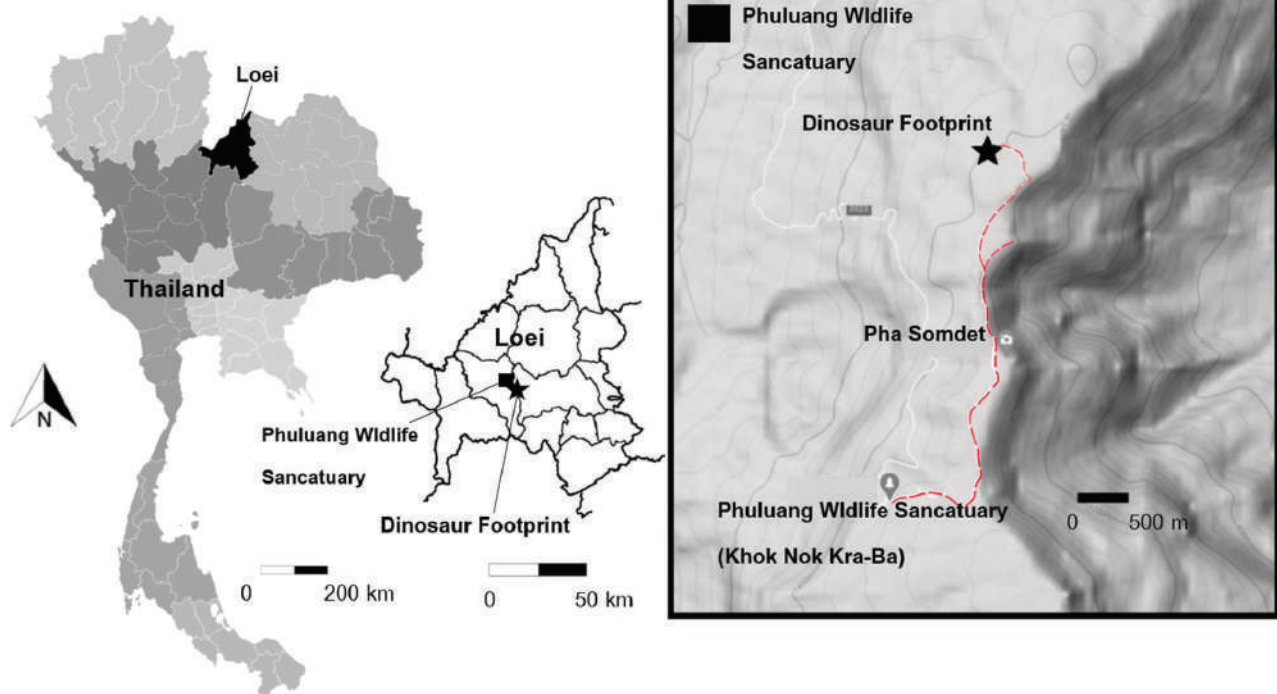


Figure 1 Locality map showing the Phu Luang tracksite in The Wildlife Sanctuary, Loei Province, Northeastern Thailand. Image obtained using data from Google Earth Pro.



Figure 2 a. The Phu Luang tracksite on the sandstone bed of the Phu Phan Formation by Kozu (2017).
b. large theropod footprint

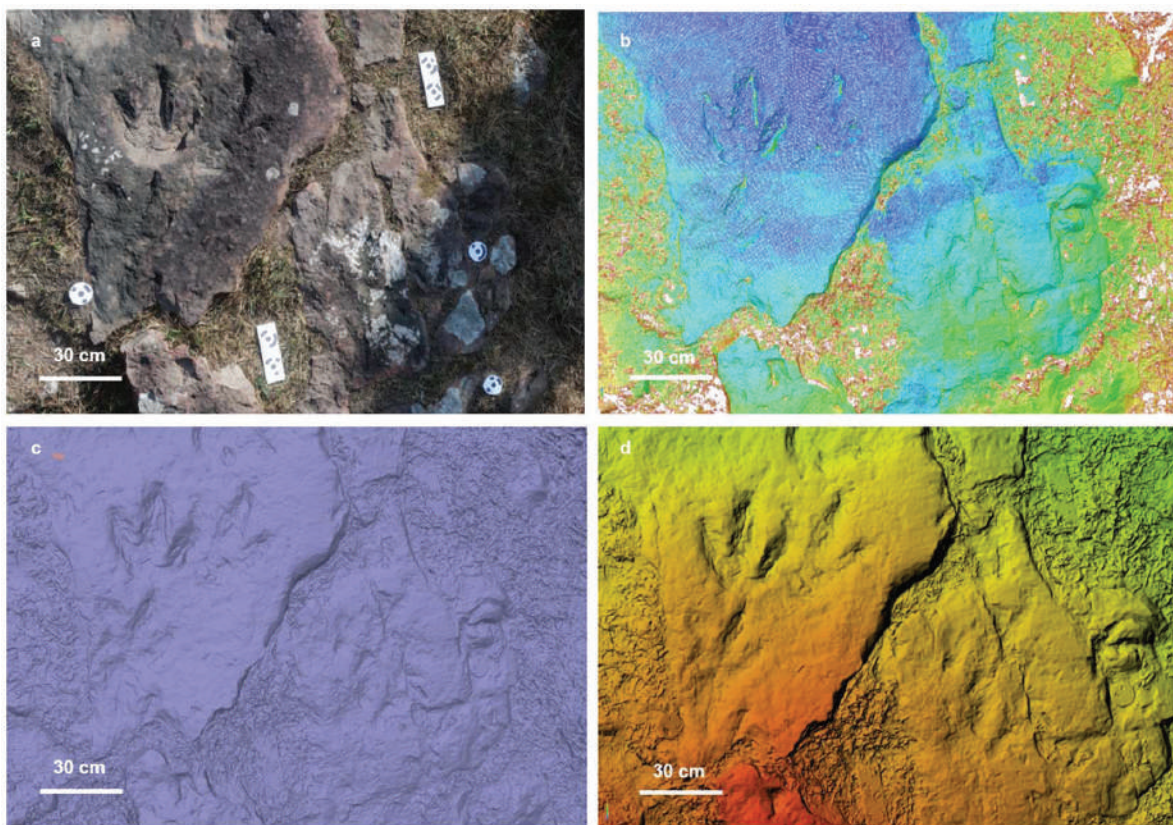


Figure 3 Comparison of the results obtained on a large area. a, photo with drawing track; b, Point cloud; c, Mesh solid model; d, DEM. All photos with a 30 cm scale.

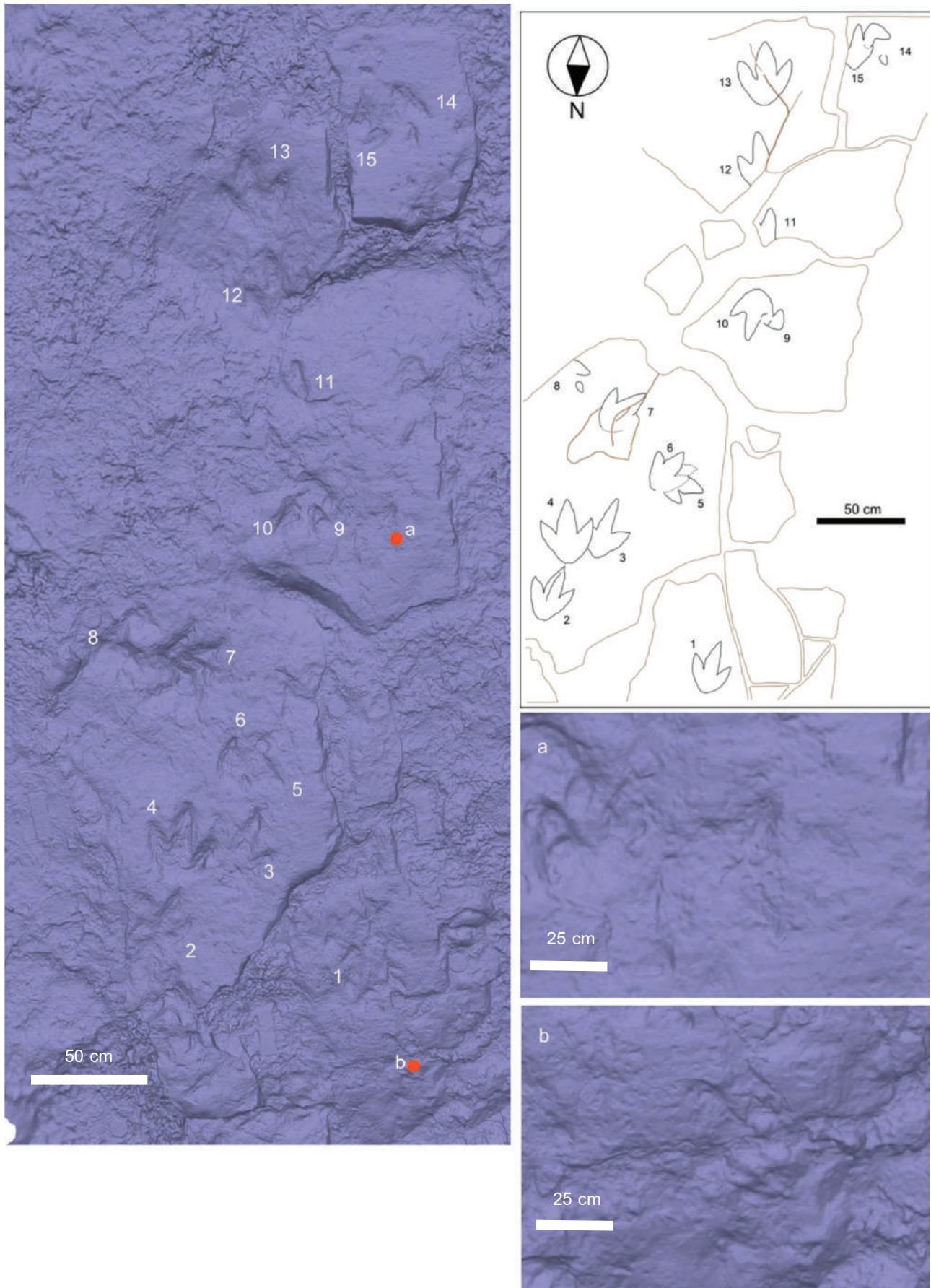


Figure 4 3D Model vs Sketch of the tracks at the site Phu Luang modified by Koza (2017).

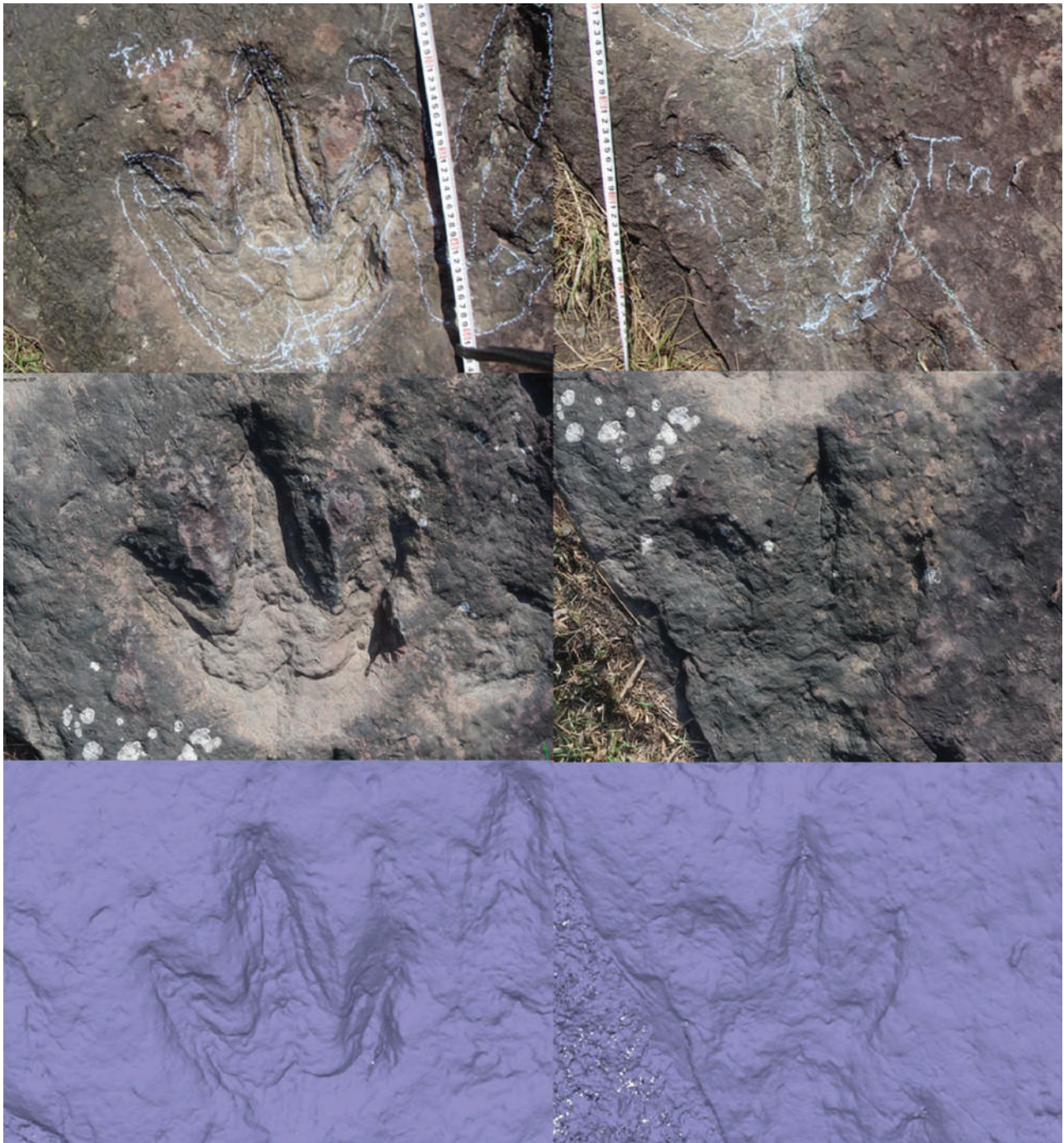


Figure 5 Comparison of the 3D model and photos Koizu (2017). Top) photo of a footprint No. 4 (left) and No. 2 (right). Middle) 3D models of footprints with texture bottom) 3D models solid without texture.

Conclusion

Photogrammetry not only produces high-quality data for monitoring, but it also shows textures and complex features that the naked eye may miss. Notably, what appears to be dinosaur tracks becomes much more obvious with closer inspection. Field data and images were used to map dinosaur tracksites. The current addition gives a new and effective tool for revealing dinosaur footprints on trampled surfaces. We report the results of photogrammetry

done at the Phu Luang tracksite. The purpose of this work was to evaluate the resolution and trustworthiness of the large-scale models beneficial for creating a detailed and georeferenced map as well as a visual contextualization of the ichnosite. This level of detail and precision enhances our ability to understand these footprints, shedding new light on the behaviors and movements of dinosaurs. These techniques provide valuable tools for scientific research and contribute to the preservation, exhibition,

and communication of tetrapod tracks. By implementing the proposed conservation measures, we can ensure the protection and appreciation of the Phu Luang track site for future generations. This site represents a significant part of the rich dinosaur heritage in the region and holds scientific, educational, and touristic value. It is important to note that the proposed photogrammetry approach does not replace traditional analytical methods such as field mapping, tracing on acetate overlays, and casting. Instead, it complements and improves these methods, providing the researcher with consistent, cost-effective, and rapid methodologies for studying tracksites at both the track and site scale.

Moreover, photogrammetry can be utilized for paleontological knowledge of tracksites and fossils for virtual sites on the web, exhibitions, and outdoor panels.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Council of Thailand (NRCT). Our sincere appreciation goes to The Phu Luang Wildlife Sanctuary and its staff for granting us permission and offering invaluable assistance during the fieldwork for this study. We also extend our gratitude to the dedicated team at the Dinosaur Research Unit of Mahasarakham University for their active involvement in the fieldwork.

References

- Albertz, J. (2007). A look back 140 years of "Photogrammetry" - Some Remakes on the history of photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 504-506.
- Buffetaut, E., Ingavat, R., Sattayarak, N. & Suteethorn, V. (1985a). Les premières empreintes de pas de Dinosaures du Sud-Est asiatique. pistes de Carnosaures du Crétacé inférieur de Thaïlande. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 309, Série II. 643-648.
- Buffetaut, E., Ingavat, R., Sattayarak, N. & Suteethorn, V. (1985b). *Early Cretaceous Dinosaur Footprints from Phu Luang (Loei Province, Northeastern Thailand) and Their Significance. Conference on Geology and Mineral Resources Development of the Northeast, Thailand*, (71-76). Khon Kaen University
- Chatzi, E., Chatzistamatis, S., Soulakellis, N., & Zouros, N. (2017). *3D Modelling of Petrified Trees: Laser Scanning vs. Photogrammetry*. IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage Lecce, October 23-25, 2017, Italy.
- Cunningham, J. A., Rahman, I. A., Lautenschlager, S., Rayfield, E.J., & Donoghue, P.C.J. (2014). A virtual world of paleontology. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(6), 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.004>
- Falkingham, P. L. (2012). Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica*, 15(1), 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004532>
- Falkingham, P. L., Bates, K. T., Avanzini, M., Bennett, M., Bordy, E. M., Breithaupt, B. H.,... & Belvedere, M. (2018). A standard protocol for documenting modern and fossil ichnological data. *Palaeontology*, 61(4), 469-480.
- Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A., & Kager, H. (2004). Terrestrial laser scanning and photogrammetry - Acquisitions techniques complementing one another, ISPRS 2004. Commission Istanbul.
- Kozu, S. (2017). *Dinosaur Footprints from the Khorat Group, Northeastern Thailand* [Doctoral Program in Earth Evolution Sciences]. The University of Tsukuba.
- Lallensack, J. N., M. Buchwitz, & A. Romillo. (2022). Photogrammetry in Ichnology: 3D model generation, visualisation, and data extraction. *Journal of Paleontological Techniques*, 22, 1-18.
- Le Loeuff, J., Saenyamoon, T., Suteethorn, V., Khansubha, S. & Buffetaut, E., (2005). Vertebrate Footprints of South-East Asia (Thailand and Laos): A review. In: Wannakao, L. (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina*, Department of Geotechnology, (582-587).
- Le Loeuff, J., Suteethorn, V. & Buffetaut, E. (2006). The oldest mentions of fossil vertebrate footprints in Thailand: A reassessment of Bishop Pallegoix and Henri Mouhot's writings. *Ichnos*, 13, 81-86.

- Lockley, M., Sato, Y. & Matsukawa, M. (2002). A new Dinosaurian Ichnogenus from the Cretaceous of Thailand. *Proceedings of the Symposium on Geology of Thailand*, (pp. 117-119). Department of Mineral Resources.
- Lockley, M., Matsukawa, M. Sato, Y, Polahan, M. & Daorerk, V. (2006). A distinctive new theropod dinosaur track from the Cretaceous of Thailand: Implications for theropod track diversity. *Cretaceous Research*, 27, 139-145.
- Lyons, P. D., Marc, R., & Patterson, T. (2000). Application of a three-dimensional color laser scanner to Paleontology. An interactive model of a juvenile *Tylosaurus* sp. basisphenoid-basioccipital. *Palaeontologia Electronica*, 3(2).
- Mallison, H., & Wings, O. (2014). Photogrammetry in Paleontology - A practical guide. *Journal of Paleontological Techniques*, (12), 1-31.
- Martínez-Fernández, A., Benito-Calvo, A., Campaña, I., Ortega, A. I., Karampaglidis, T., de Castro, J.M.B., & Carbonell, E. (2020). 3D monitoring of Paleolithic archaeological excavations using terrestrial laser scanner systems (Sierra de Atapuerca, Railway Trench sites, Burgos, N Spain). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 19, e00156.
- Petti Fabio Massimo, Petruzzelli, M., Conti, J., Spalluto, L., Wagensommer, A., Lamendola, M., Francioso, R., Montrone, G., Sabato, L., & Tropeano, M. (2018). The use of aerial and close-range photogrammetry in the study of dinosaur tracksites: Lower Cretaceous (upper Aptian / lower Albian) Molfetta ichnosite (Apulia, southern Italy). *Palaeontologia Electronica*, 21(3), 1-18.

การจัดเรียงใหม่เป็นหนึ่งมิติของอนุกรมซ้อนกันและสูตรลดทอน

Rearrangement to one-dimensional iterated series and reduction formulas

รัชนาย ไช้แก้ว¹ และ ฉัตรชัย พุฒิรุ่งโรจน์^{2*}

Rachanai Kaikeaw¹ and Chatchai Puttirungroj^{2*}

Received: 13 July 2023 ; Revised: 5 October 2023 ; Accepted: 6 November 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเงื่อนไขที่เพียงพอในการจัดเรียงอนุกรมซ้อนกันหลายชั้นให้เป็นอนุกรมชั้นเดียวโดยใช้วิธีพื้นฐานในการพิสูจน์ และอาศัยเงื่อนไขดังกล่าวเพื่อสร้างสูตรลดทอนสำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \cdots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \cdots x_k)^t \cdot f(x_1 + x_2 + \cdots + x_k)$

เมื่อ $f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ และ $t \in \{0, 1, 2\}$, โดยใช้วิธีทางฟังก์ชันก่อกำเนิด

คำสำคัญ: อนุกรมหลายชั้น, อนุกรมซ้อนกัน, สูตรลดทอน

Abstract

This article investigates the sufficient conditions for the rearrangement of multiple iterated series into a single-level series through the utilization of fundamental proof methods. These conditions were subsequently applied to establish reduction formulas for a series of the form $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \cdots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \cdots x_k)^t \cdot f(x_1 + x_2 + \cdots + x_k)$, where $f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ and $t \in \{0, 1, 2\}$, employing techniques derived from generating functions.

Keywords: Multiple series, iterated series, reduction formula

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี กรุงเทพมหานคร Email rachanai.k@dru.ac.th

² สาขาวิชาศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี Email cputtirungroj@gmail.com

¹ Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University, Bangkok

² School of Educational Studies, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi

* Corresponding author E-mail: cputtirungroj@gmail.com

บทนำ

ในปี ค.ศ. 2011 Furdui และ Trif (Furdui & Trif, 2011) ได้ศึกษาวิธีทั่วไปสำหรับการหาผลรวมของอนุกรมที่อยู่ในรูป $\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_{n+m}$ เมื่อ $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ เป็นลำดับของจำนวนจริงภายใต้เงื่อนไขบางประการ และในบทความเดียวกันพวกเขาได้หารูปแบบปิดของอนุกรมที่อยู่ในรูป $\sum_{n_1=1}^{\infty} \sum_{n_2=1}^{\infty} \dots \sum_{n_k=1}^{\infty} a_{n_1+n_2+\dots+n_k}$ อีกด้วย ต่อมาในปี ค.ศ. 2013 Furdui (Furdui, 2013) กล่าวถึงปัญหาปลายเปิดและข้อความคาดการณ์เกี่ยวกับอนุกรมหลายชั้น $\sum_{n_1, n_2, \dots, n_k=1}^{\infty} \frac{n_1 n_2 \dots n_k}{(n_1 + n_2 + \dots + n_k)!}$ ซึ่งปัญหานี้ถูกแก้โดย Furdui และ Qin ในปี ค.ศ. 2015 (Qin & Furdui, 2015)

จากผลงานของ Furdui ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่ามีขั้นตอนบางส่วนที่สามารถขยายแนวคิดไปยังอนุกรมอื่นที่มีลักษณะคล้ายกันได้ ในบทความนี้ เราพิจารณาอนุกรมที่อยู่ในรูป

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) \tag{1.1}$$

เมื่อ $k \in \mathbb{N}$, $g: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R}$ และ $f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ (\mathbb{N}_0 แทนเซตของจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ) วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือการพิสูจน์ทฤษฎีบทการจัดเรียงใหม่เป็นหนึ่งมิติ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญที่จะทำให้เราสามารถนำแต่ละพจน์ของอนุกรมซ้อนกันหลายชั้นมาจัดเรียงใหม่ให้เป็นแนวตรงได้ จากนั้นอาศัยทฤษฎีบทดังกล่าวในการสร้างสูตรลดทอนสำหรับอนุกรม (1.1) ให้เป็นอนุกรมอนันต์ชั้นเดียว และสร้างสูตรลดทอนสำหรับอนุกรมที่มีรูปแบบเฉพาะบางชนิด นั่นคือ อนุกรมที่อยู่ในรูป

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \dots x_k)^t \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) \tag{1.2}$$

เมื่อ $k \in \mathbb{N}$, $f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ และ $t \in \{0, 1, 2\}$

หมายเหตุ ในที่นี้ กำหนด $(x_1 x_2 \dots x_k)^t = 1$ เมื่อ $t = 0$ และ $x_1 x_2 \dots x_k = 0$

ความรู้พื้นฐาน

อนุกรมหลายชั้น (multiple series) มีรูปแบบทั่วไปได้หลายลักษณะ เช่น รูปแบบ (2.1) และ (2.2) ต่อไปนี้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \tag{2.1}$$

$$\sum_{x_1, x_2, \dots, x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \tag{2.2}$$

เมื่อ $A: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{C}$ อนุกรมทั้งสองรูปแบบมีความหมายและบทนิยามของการลู่ออกแตกต่างกันในบทความนี้ เราสนใจอนุกรมรูปแบบ (2.1) ซึ่งเรียกว่า อนุกรมซ้อนกันหลายชั้น (multiple iterated series) (Furdui, 2013) และมีบทนิยามของการลู่ออก ดังนี้

บทนิยาม 2.1

สำหรับจำนวนเต็ม $k \geq 2$ และ $A: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{C}$ เราจะกล่าวว่า อนุกรมซ้อนกัน k ชั้น

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

ลู่ออก ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้งสองข้อต่อไปนี้เป็นจริง

1. อนุกรมซ้อนกัน $k - 1$ ชั้น

$$\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

ลู่ออก ทุก $x_1 \in \mathbb{N}_0$.

2. อนุกรม $\sum_{x_1=0}^{\infty} B(x_1)$ ลู่ออก โดยที่

$$B(x_1) = \sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad \text{ทุก } x_1 \in \mathbb{N}_0$$

การพิสูจน์ทฤษฎีบทหลักจะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเรื่องอนุกรมอนันต์ซึ่งพบได้ทั่วไปจากเอกสารเกี่ยวกับแคลคูลัสและคณิตวิเคราะห์ ในที่นี้จะอ้างถึงเฉพาะข้อเท็จจริงบางส่วนเท่าที่จำเป็น

บทตั้ง 2.1

ให้ $A: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ ถ้า $\sum_{x=0}^{\infty} A(x)$ ลู่ออก และ $A(x) \geq 0$ ทุก $x \in \mathbb{N}_0$ แล้ว ทุกจำนวนจริง α ซึ่ง $\alpha < \sum_{x=0}^{\infty} A(x)$ จะมีจำนวนเต็ม $N > 0$ ซึ่ง $\sum_{x=0}^N A(x) > \alpha$

บทตั้ง 2.2

ให้ $A: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ ถ้า $\sum_{x=0}^{\infty} A(x)$ ลู่ออก $A(x) \geq 0$ และทุก $x \in \mathbb{N}_0$ แล้ว ทุกจำนวนจริง $\alpha > 0$ จะมีจำนวนเต็ม $N > 0$ ซึ่ง $\sum_{x=0}^N A(x) > \alpha$

บทตั้ง 2.1 และบทตั้ง 2.2 สามารถขยายแนวคิดไปสู่อนุกรมซ้อนกันหลายชั้นได้เป็นบทตั้ง 2.3 และบทตั้ง 2.4 ตามลำดับ

บทตั้ง 2.3

ให้ $k \in \mathbb{N}$ และ $A: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R}$

ถ้าอนุกรม $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ ลู่ออก และ

$A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq 0$ ทุก $x_1, x_2, \dots, x_k \in \mathbb{N}_0^k$ แล้วจะได้ว่า ทุกจำนวนจริง α ซึ่ง

$$\alpha < \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

จะมีเซตจำกัด $S \subseteq \mathbb{N}_0^k$ ซึ่ง

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$$

บทพิสูจน์

พิสูจน์โดยอุปนัยเชิงคณิตศาสตร์บนตัวแปร k

ขั้นฐานของการอุปนัย

(กรณี $k = 1$) เห็นได้ชัดจากบทตั้ง 2.1

ขั้นการอุปนัย (สมมติให้บทตั้งเป็นจริงกรณี k จะ

พิสูจน์ว่าบทตั้งเป็นจริงกรณี $k + 1$)

ในการพิสูจน์บทตั้งกรณี $k + 1$ จะเริ่มจากการสมมติ

ว่า

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ลู่เข้า และ } A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \geq 0 \text{ ทุก } x_1, x_2, \dots, x_{k+1} \in \mathbb{N}_0^{k+1}$$

จากบทนิยาม 2.1 จะได้ว่า

$$\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ลู่เข้าทุก } x_1 \in \mathbb{N}_0 \text{ เราจึงสามารถกำหนดให้}$$

$$B(x_1) = \sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1})$$

ทุก $x_1 \in \mathbb{N}_0$ นอกจากนี้ กำหนดให้ $\beta = \sum_{x_1=0}^{\infty} B(x_1)$

ส่วนที่เหลือคือการพิสูจน์ข้อความต่อไปนี้

“ทุกจำนวนจริง α ซึ่ง $\alpha < \beta$ จะมีเซตจำกัด

$$S \subseteq \mathbb{N}_0^{k+1} \text{ ซึ่ง } \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$$

ให้ α เป็นจำนวนจริง โดยที่ $\alpha < \beta$ จะได้

$$\frac{\alpha + \beta}{2} < \sum_{x_1=0}^{\infty} B(x_1) \text{ จากบทตั้ง 2.1 จะมีจำนวนเต็ม}$$

$$N > 0 \text{ ที่ทำให้ } \sum_{x_1=0}^N B(x_1) > \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$\text{เนื่องจาก } B(x_1) - \frac{\beta - \alpha}{2N} < B(x_1) = \sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1})$$

ทุก $x_1 \in \mathbb{N}_0$ เมื่อใช้บทตั้งนี้ในกรณี k กับอนุกรม

$$\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ทุกค่า } x_1 \in \mathbb{N}_0 \text{ จะได้ว่า แต่ละ } x_1 \in \mathbb{N}_0 \text{ จะมีเซตจำกัด } S_{x_1} \subseteq \mathbb{N}_0^k \text{ ซึ่ง}$$

$$\sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > B(x_1) - \frac{\beta - \alpha}{2N}$$

ดังนั้น

$$\sum_{x_1=0}^N \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \sum_{x_1=0}^N B(x_1) - \frac{\beta - \alpha}{2} > \frac{\alpha + \beta}{2} - \frac{\beta - \alpha}{2} = \alpha$$

เพราะฉะนั้น จึงมีเซตจำกัด

$$S = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in \mathbb{N}_0^{k+1} \mid 0 \leq x_1 \leq N, (x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1} \right\}$$

ซึ่ง

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) = \sum_{x_1=0}^N \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$$

□

บทตั้ง 2.4

ให้ $k \in \mathbb{N}$ และ $A: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R}$

ถ้า $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$ ลู่ ออก

และ

$A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq 0$ ทุก $x_1, x_2, \dots, x_k \in \mathbb{N}_0^k$ แล้ว ทุกจำนวนจริง $\alpha > 0$ จะมีเซตจำกัด $S \subseteq \mathbb{N}_0^k$ ซึ่ง

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$$

บทพิสูจน์

พิสูจน์โดยอุปนัยเชิงคณิตศาสตร์บนตัวแปร k

ขั้นฐานของการอุปนัย

(กรณี $k = 1$) เห็นได้ชัดจากบทตั้ง 2.2

ขั้นการอุปนัย

(สมมติให้บทตั้งเป็นจริงกรณี k จะพิสูจน์ว่าบทตั้ง

เป็นจริงกรณี $k + 1$)

ในการพิสูจน์บทตั้งกรณี $k + 1$ จะเริ่มจากการสมมติ

$$\text{ว่า } \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1})$$

ลู่ออกและ

$$A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \geq 0 \text{ ทุก } x_1, x_2, \dots, x_{k+1} \in \mathbb{N}^{k+1}$$

จากนั้นจะต้องพิสูจน์ข้อความต่อไปนี้

“ทุกจำนวนจริง $\alpha > 0$ จะมีเซตจำกัด

$$S \subseteq \mathbb{N}_0^{k+1} \text{ ซึ่ง } \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$$

จากบทนิยาม 2.1 เมื่อ

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ลู่ออก จะเกิดได้}$$

2 กรณี คือ

1. กรณีมี $x_j \in \mathbb{N}_0$ ที่ทำให้

$$\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ลู่ออก}$$

ให้จำนวนจริง $\alpha > 0$ โดยบทตั้งกรณี k จะมีเซตจำกัด $S_{x_1} \subseteq \mathbb{N}_0^k$ ซึ่ง $\sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$ ดังนั้นจึงมีเซตจำกัด

$$S = \left\{ \begin{array}{l} (x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in \mathbb{N}_0^{k+1} \\ (x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1} \end{array} \right\}$$

$$\text{ซึ่ง } \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) = \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$$

2. กรณี $\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1})$ ลู่เข้า

ทุก $x_j \in \mathbb{N}_0$

กำหนดให้

$$B(x_1) = \sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ทุก } x_1 \in \mathbb{N}_0$$

ให้จำนวนจริง $\alpha > 0$ เนื่องจาก $\sum_{x_1=0}^{\infty} B(x_1)$ ลู่ออก และ $B(x_1) \geq 0$ ทุก $x_1 \in \mathbb{N}_0$ โดยบทตั้ง 2.2 จะมี

จำนวนเต็ม $N > 0$ ที่ทำให้ $\sum_{x_1=0}^N B(x_1) > \alpha + 1$

เนื่องจาก $B(x_1) - \frac{1}{N} < B(x_1)$

$$= \sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ทุก } x_1 \in \mathbb{N}_0$$

เมื่อใช้บทตั้ง 2.3 กับอนุกรม

$$\sum_{x_2=0}^{\infty} \sum_{x_3=0}^{\infty} \dots \sum_{x_{k+1}=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \text{ ทุกค่า } x_1 \in \mathbb{N}$$

จะได้ว่า แต่ละ $x_1 \in \mathbb{N}_0$ จะมีเซตจำกัด $S_{x_1} \subseteq \mathbb{N}_0^k$

$$\text{ซึ่ง } \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > B(x_1) - \frac{1}{N}$$

$$\text{ดังนั้น } \sum_{x_1=0}^N \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \sum_{x_1=0}^N B(x_1) - 1 > \alpha + 1 - 1 = \alpha$$

เพราะฉะนั้น จึงมีเซตจำกัด

$$S = \left\{ \begin{array}{l} (x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in \mathbb{N}_0^{k+1} \\ 0 \leq x_1 \leq N, (x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1} \end{array} \right\}$$

$$\text{ซึ่ง } \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) = \sum_{x_1=0}^N \sum_{(x_2, x_3, \dots, x_{k+1}) \in S_{x_1}} A(x_1, x_2, \dots, x_{k+1}) > \alpha$$

□

นอกจากความรู้พื้นฐานที่กล่าวมาข้างต้น ผู้อ่านจะต้องอาศัยความรู้เรื่อง ฟังก์ชันก่อกำเนิด (generating function) และ ทฤษฎีบททวินามติดลบ (negative binomial theorem) ซึ่งสามารถทบทวนได้ที่ (Beeler, 2015), (Chuan-Chong & Khee-Meng, 1992) หรือเอกสารทั่วไปเกี่ยวกับคณิตศาสตร์เชิงการจัด เพื่อใช้ประกอบการศึกษาหัวข้อถัดไป

การจัดเรียงใหม่ให้เป็นหนึ่งมิติ

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า \mathbb{N}_0^k เป็น เซตนับได้ (countable set) นั่นคือ เราสามารถนำสมาชิกทั้งหมดใน \mathbb{N}_0^k ซึ่งอยู่ในปริภูมิ k มิติ มาเรียงลำดับใหม่เป็นแนวตรงได้ ดังนั้นเราอาจลดทอนอนุกรมอนันต์ที่ซ้อนกัน k ชั้นให้เหลือเพียงอนุกรมอนันต์ชั้นเดียวโดยสร้างกฎเกณฑ์สำหรับเรียงลำดับแต่ละพจน์ที่ปรากฏในผลบวก k มิติให้เป็นผลบวกแนวตรงซึ่งมีหนึ่งมิติ อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้อาจส่งผลกระทบต่อ การลู่เข้าหรือค่าของอนุกรม ทฤษฎีบทที่จะพิสูจน์ในหัวข้อนี้ช่วยยืนยันได้ว่า ในกรณีที่แต่ละพจน์ของอนุกรมเป็นค่าจริงที่ไม่เป็นลบและในกรณีที่อนุกรมลู่เข้าอย่างสัมบูรณ์ กระบวนการดังกล่าวจะไม่ทำให้การลู่เข้าหรือค่าของอนุกรมเปลี่ยนแปลง

ทฤษฎีบท 3.1 ให้ $k \in \mathbb{N}$, $A : \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R}$,

และ $\phi : \mathbb{N}_0 \xrightarrow{1-1} \mathbb{N}_0^k$ ถ้า $A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq 0$

ทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$ แล้ว จะได้ว่า

ก. $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ ลู่เข้า

ก็ต่อเมื่อ $\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$ ลู่เข้า

ข. ถ้า $\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$ ลู่เข้า แล้ว

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$$

บทพิสูจน์ ก.

ข้อความที่ต้องการพิสูจน์สมมูลกับ

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \text{ ลู่ออก ก็ต่อเมื่อ}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \text{ ลู่ออก}$$

(\Rightarrow) สมมติให้ $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$

ลู่ออก จากบทตั้ง 2.4 จะได้ว่า

ทุกจำนวนจริง $\alpha > 0$ จะมีเซตจำกัด $S \subseteq \mathbb{N}_0^k$ ซึ่ง

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$$

เนื่องจาก $\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$

เป็นผลบวกจำกัด ซึ่งทุกพจน์ปรากฏใน $\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$

โดยที่ $A(\phi(n)) \geq 0$ ทุก $n \in \mathbb{N}_0$ จะได้ว่า

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \geq \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$$

อสมการข้างต้นเป็นจริงทุกค่า $\alpha > 0$ ดังนั้น

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \text{ ลู่ออก}$$

(\Leftarrow) สมมติให้ $\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$ ลู่ออก จากบทตั้ง

2.2 จะได้ว่า ทุกจำนวนจริง $\alpha > 0$ จะมีจำนวนเต็ม $N > 0$

ซึ่ง $\sum_{n=0}^N A(\phi(n)) > \alpha$

เนื่องจาก $\sum_{n=0}^N A(\phi(n))$ เป็นผลบวกจำกัด ซึ่ง

ทุกพจน์ปรากฏใน $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ โดยที่

$$A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq 0 \text{ ทุก } (x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$$

จะได้ว่า

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq \sum_{n=0}^N A(\phi(n)) > \alpha$$

อสมการข้างต้นเป็นจริงทุกค่า $\alpha > 0$ ดังนั้น

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \text{ ลู่ออก}$$

บทพิสูจน์ ข.

จากข้อ ก. เมื่อ $\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$ ลู่เข้า

จะได้ $\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ ลู่เข้าด้วย

ต่อไปจะพิสูจน์ 2 ส่วน ดังนี้

1. พิสูจน์ว่า

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$$

ให้ α เป็นจำนวนจริง ซึ่ง $\alpha < \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$

จากบทตั้ง 2.1 จะมีจำนวนเต็ม $N > 0$ ที่ทำให้

$$\sum_{n=0}^N A(\phi(n)) > \alpha \text{ ดังนั้น}$$

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq \sum_{n=0}^N A(\phi(n)) > \alpha$$

อสมการข้างต้นเป็นจริงทุกค่า α ซึ่ง $\alpha < \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$

เพราะฉะนั้น

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$$

2. พิสูจน์ว่า

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \geq \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

ให้ α เป็นจำนวนจริง ซึ่ง

$$\alpha < \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

จากบทตั้ง 2.3 จะมีเซตจำกัด $S \subseteq \mathbb{N}_0^k$

ซึ่ง $\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$

ดังนั้น

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \geq \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in S} A(x_1, x_2, \dots, x_k) > \alpha$$

อสมการข้างต้นเป็นจริงทุกค่า α ซึ่ง

$$\alpha < \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

เพราะฉะนั้น

$$\sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n)) \geq \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

□

ทฤษฎีบทต่อไปเป็นอีกเงื่อนไขหนึ่งซึ่งสามารถใช้สำหรับอนุกรมที่มีบางพจน์เป็นจำนวนจริงที่ติดลบหรือเป็นจำนวนเชิงซ้อน โดยเกี่ยวข้องกับการลู่เข้าอย่างสัมบูรณ์

ทฤษฎีบท 3.2 ให้ $k \in \mathbb{N}$, $A: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{C}$ และ

$\phi: \mathbb{N}_0 \xrightarrow{1-1} \mathbb{N}_0^k$ ถ้า $\sum_{n=0}^{\infty} |A(\phi(n))|$ ลู่เข้าแล้ว จะได้ว่า

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$$

บทพิสูจน์

สำหรับทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$

ให้ $R(x_1, x_2, \dots, x_k)$ แทน ส่วนจริง (real part) ของ $A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ เราทราบว่า $\sum_{n=0}^{\infty} |A(\phi(n))|$ ลู่เข้า และ

$$|A(\phi(n))| \geq |R(\phi(n))| \geq 0 \text{ ทุก } n \in \mathbb{N}_0$$

จะได้ $\sum_{n=0}^{\infty} |R(\phi(n))|$ ลู่เข้า โดยการทดสอบโดยการเปรียบเทียบ (comparison test)

เนื่องจาก $\sum_{n=0}^{\infty} 2|R(\phi(n))|$ ลู่เข้า และ

$$2|R(\phi(n))| \geq |R(\phi(n))| - R(\phi(n)) \geq 0$$

ทุก $n \in \mathbb{N}_0$ จะได้ $\sum_{n=0}^{\infty} (|R(\phi(n))| - R(\phi(n)))$

ลู่เข้า โดยการทดสอบโดยการเปรียบเทียบ เช่นกัน

เห็นได้ชัดว่า $|R(x_1, x_2, \dots, x_k)| \geq 0$

ทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$

จากทฤษฎีบท 3.1 จะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} |R(x_1, x_2, \dots, x_k)| = \sum_{n=0}^{\infty} |R(\phi(n))| \tag{1}$$

นอกจากนี้

$$|R(x_1, x_2, \dots, x_k)| - R(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq 0$$

ทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$

จากทฤษฎีบท 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} & \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} (|R(x_1, x_2, \dots, x_k)| - R(x_1, x_2, \dots, x_k)) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (|R(\phi(n))| - R(\phi(n))) \end{aligned} \tag{2}$$

นำสมการ (1) ลบด้วยสมการ (2) จะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} R(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} R(\phi(n)) \tag{3}$$

สำหรับทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$

ให้ $I(x_1, x_2, \dots, x_k)$ แทน ส่วนจินตภาพ (imaginary part) ของ $A(x_1, x_2, \dots, x_k)$ จะสามารถพิสูจน์ได้ในทำนองเดียวกับ (3) ว่า

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} I(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} I(\phi(n)) \tag{4}$$

จากสมการ (3) และ (4) เราจะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} A(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} A(\phi(n))$$

□

สูตรลดทอน

ผลลัพธ์จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้เราได้สูตรลดทอนสำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป (1.1) ดังนี้

ทฤษฎีบท 4.1 ให้ $k \in \mathbb{N}$, $g: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R}$ และ

$f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ นอกจากนี้ กำหนดให้

$$A_n = \{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k \mid x_1 + x_2 + \dots + x_k = n\}$$

สำหรับทุก $n \in \mathbb{N}_0$

ถ้า $g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) \geq 0$

ทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$ แล้ว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(n) \end{aligned} \tag{4.1}$$

บทพิสูจน์

เนื่องจาก A_n เป็นเซตจำกัดที่ไม่ใช่เซตว่าง ทุก $n \in \mathbb{N}_0$ ดังนั้น จะมีฟังก์ชัน

$$\theta_n: \{0, 1, 2, \dots, a_n - 1\} \xrightarrow{1-1} A_n \text{ ทุกค่า } n \in \mathbb{N}_0$$

โดยที่จำนวนเต็ม $a_n \geq 1$ แทนจำนวนสมาชิกของ A_n ซึ่งจะเห็นว่า $a_0 = 1$ และ $\theta_0(0) = (0, 0, \dots, 0)$

ให้ $b_n = \sum_{r=0}^n a_r$ ทุก $n \in \mathbb{N}_0$ จะได้ว่า $\{b_n\}_{n \in \mathbb{N}_0}$ เป็น

ลำดับเพิ่มบน \mathbb{N} ดังนั้น ทุก $n \in \mathbb{N}$ จะมี $s_n \in \mathbb{N}_0$ เพียงค่าเดียวซึ่ง $b_{s_n} \leq n < b_{s_n+1}$ นั่นคือ $n - b_{s_n} \in \{0, 1, 2, \dots, a_{s_n+1} - 1\}$

เราจึงสามารถนิยามฟังก์ชัน $\phi: \mathbb{N}_0 \rightarrow \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n$ โดย

$$\phi(n) = \begin{cases} \theta_{s_n+1}(n - b_{s_n}) & ; n \in \mathbb{N} \\ (0, 0, \dots, 0) & ; n = 0 \end{cases}$$

กล่าวคือ ฟังก์ชัน ϕ เป็นการเรียงสมาชิกทั้งหมดของ $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n$ โดยเริ่มจากสมาชิกของ A_0 ตามด้วยสมาชิกของ A_1 ตามด้วยสมาชิกของ A_2 และเป็นเช่นนี้เรื่อยไปตามลำดับ นอกจากนี้ $\{A_0, A_1, A_2, \dots\}$ เป็นผลแบ่งกัน (partition)

ของ \mathbb{N}_0^k ทำให้สรุปได้ว่า $\phi: \mathbb{N}_0 \xrightarrow[\text{onto}]{} \mathbb{N}_0^k$

ต่อไป นิยามฟังก์ชัน

$$h: \mathbb{N}_0^k \rightarrow \mathbb{R} \text{ โดย}$$

$$h(x_1, x_2, \dots, x_k) = g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k)$$

ทุก $(x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{N}_0^k$

จะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} h(\phi(n)) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} h(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} g(x_1, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + \dots + x_k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(n) \end{aligned}$$

จากทฤษฎีบท 3.1 จะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} h(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} h(\phi(n))$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} &\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} g(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot f(n) \end{aligned}$$

□

หมายเหตุ ถ้าอนุกรมด้านใดด้านหนึ่งของสมการ (4.1) ลู่ออก แล้วอนุกรมอีกด้านจะลู่ออกด้วย

สูตรลดทอนที่เราได้สำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป (1.2) คือทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 4.2 ให้ $k \in \mathbb{N}$ และ $f: \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{R}$ ถ้า $f(n) \geq 0$ ทุก $n \in \mathbb{N}_0$ แล้ว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ก. } \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) &= \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{k-1} f(n) \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned} \text{ข. } \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} x_1 x_2 \dots x_k \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) &= \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{2k-1} f(n) \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned} \text{ค. } \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \dots x_k)^2 \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{r=0}^k \binom{k}{r} \binom{n+2k-r-1}{3k-1} f(n) \end{aligned} \tag{4.4}$$

บทพิสูจน์ ก.

จากทฤษฎีบท 4.1 จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} 1 \cdot f(n) \end{aligned}$$

$$\text{สังเกตว่า } \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} 1$$

คือสัมประสิทธิ์ของ z^n จากการกระจายฟังก์ชันก่อกำเนิด

$$F(z) = \left(\sum_{m=0}^{\infty} z^m \right)^k = (1 + z + z^2 + \dots)^k$$

ในขณะที่เดียวกันเราทราบว่า

$$\sum_{m=0}^{\infty} z^m = \frac{1}{1-z}$$

ดังนั้น สามารถเขียน $F(z)$ ได้อีกแบบคือ

$$F(z) = \left(\frac{1}{1-z} \right)^k = (1-z)^{-k} = \sum_{m=0}^{\infty} \binom{m+k-1}{k-1} z^m \quad ; \text{ ทฤษฎีบททวินาม}$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของ z^n ใน $F(z)$ จะได้

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} 1 = \binom{n+k-1}{k-1}$$

ดังนั้น

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{k-1} f(n)$$

บทพิสูจน์ ข.

จากทฤษฎีบท 4.1 จะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} x_1 x_2 \dots x_k \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} x_1 x_2 \dots x_k \cdot f(n)$$

สังเกตว่า $\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} x_1 x_2 \dots x_k$

คือสัมประสิทธิ์ของ z^n จากการกระจายฟังก์ชันก่อกำเนิด

$$F(z) = \left(\sum_{m=0}^{\infty} m z^m \right)^k = (z + 2z^2 + 3z^3 + \dots)^k$$

ในขณะที่เดียวกันเราทราบว่า

$$\sum_{m=0}^{\infty} m z^m = \frac{z}{(1-z)^2}$$

ดังนั้น สามารถเขียน $F(z)$ ได้อีกแบบคือ

$$F(z) = \left(\frac{z}{(1-z)^2} \right)^k = z^k (1-z)^{-2k} = z^k \sum_{m=0}^{\infty} \binom{m+2k-1}{2k-1} z^m \quad ; \text{ ทฤษฎีบททวินาม}$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} \binom{m+2k-1}{2k-1} z^{m+k}$$

$$= \sum_{m=-k}^{\infty} \binom{m+2k-1}{2k-1} z^{m+k} \quad ;$$

$$\binom{m+2k-1}{2k-1} = 0 \text{ เมื่อ } -k \leq m < 0$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} \binom{m+k-1}{2k-1} z^m$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของ z^n ใน $F(z)$ จะได้

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} x_1 x_2 \dots x_k = \binom{n+k-1}{2k-1}$$

ดังนั้น

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} x_1 x_2 \dots x_k \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{2k-1} f(n)$$

บทพิสูจน์ ค.

จากทฤษฎีบท 4.1 จะได้

$$\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \dots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \dots x_k)^2 \cdot f(x_1 + x_2 + \dots + x_k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} (x_1 x_2 \dots x_k)^2 \cdot f(n)$$

สังเกตว่า $\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} (x_1 x_2 \dots x_k)^2$

คือสัมประสิทธิ์ของ z^n จากการกระจายฟังก์ชันก่อกำเนิด

$$F(z) = \left(\sum_{m=0}^{\infty} m^2 z^m \right)^k = (z + 2^2 z^2 + 3^2 z^3 + \dots)^k$$

ในขณะเดียวกันเราทราบว่า

$$\sum_{m=0}^{\infty} m^2 z^m = \frac{z(1+z)}{(1-z)^3}$$

ดังนั้นสามารถเขียน $F(z)$ ได้อีกแบบคือ

$$\begin{aligned} F(z) &= \left(\frac{z(1+z)}{(1-z)^3} \right)^k = z^k (1+z)^k (1-z)^{-3k} \\ &= z^k \sum_{r=0}^k \binom{k}{r} z^r \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \binom{m+3k-1}{3k-1} z^m \end{aligned}$$

; ทฤษฎีบททวินาม

$$\begin{aligned} &= \sum_{r=0}^k \sum_{m=0}^{\infty} \binom{k}{r} \binom{m+3k-1}{3k-1} z^{m+r+k} \\ &= \sum_{r=0}^k \sum_{m=-r-k}^{\infty} \binom{k}{r} \binom{m+3k-1}{3k-1} z^{m+r+k}; \end{aligned}$$

$$\binom{m+3k-1}{3k-1} = 0 \text{ เมื่อ } 0 \leq r \leq k, -r-k \leq m < 0$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{r=0}^k \sum_{m=0}^{\infty} \binom{k}{r} \binom{m+2k-r-1}{3k-1} z^m \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{r=0}^k \binom{k}{r} \binom{m+2k-r-1}{3k-1} z^m \end{aligned}$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของ z^n ใน $F(z)$ จะได้

$$\sum_{(x_1, x_2, \dots, x_k) \in A_n} (x_1 x_2 \cdots x_k)^2 = \sum_{r=0}^k \binom{k}{r} \binom{n+2k-r-1}{3k-1}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} &\sum_{x_1=0}^{\infty} \sum_{x_2=0}^{\infty} \cdots \sum_{x_k=0}^{\infty} (x_1 x_2 \cdots x_k)^2 \cdot f(x_1 + x_2 + \cdots + x_k) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{r=0}^k \binom{k}{r} \binom{n+2k-r-1}{3k-1} f(n) \quad \square \end{aligned}$$

หมายเหตุ ถ้าอนุกรมด้านใดด้านหนึ่งของสมการ (4.2), (4.3) และ (4.4) ลู่ออก แล้วอนุกรมอีกด้านจะลู่ออกด้วย

ตัวอย่างการประยุกต์

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการคำนวณค่าของอนุกรมซ้อนกันหลายชั้นโดยประยุกต์ทฤษฎีบท 4.2 เพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นภาพการใช้งานพอสังเขป

ตัวอย่าง 5.1

หาค่าของอนุกรม
$$\sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{1}{(x+y+z)!}$$

วิธีทำ

ให้ $f(n) = \frac{1}{n!}$ จะได้ $f(n) \geq 0$ ทุก $n \in \mathbb{N}_0$.

จากทฤษฎีบท 4.2 (ก) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{1}{(x+y+z)!} &= \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+2}{2} \frac{1}{n!} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)}{n!} \end{aligned}$$

เราทราบว่า $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ นั่นคือ $x^2 e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{n+2}}{n!}$ ทุก $x \in \mathbb{R}$ และเนื่องจากอนุกรมกำลังสามารถหาอนุพันธ์ได้เทอมต่อเทอม ดังนั้นอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของ $x^2 e^x$ ที่ $x = 1$ คือ

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} (x^2 e^x) \Big|_{x=1} &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{x^{n+2}}{n!} \right) \Big|_{x=1} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)}{n!} \end{aligned}$$

แต่จะเห็นว่า

$$\frac{d^2}{dx^2} (x^2 e^x) \Big|_{x=1} = (x^2 e^x + 4x e^x + 2e^x) \Big|_{x=1} = 7e$$

เพราะฉะนั้น

$$\sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{1}{(x+y+z)!} = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2} (x^2 e^x) \Big|_{x=1} = \frac{7e}{2} \quad \square$$

ตัวอย่าง 5.2

หาค่าของอนุกรม

$$\sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{xyz}{(x+y+z)!}$$

วิธีทำ

โดยวิธีเดียวกับตัวอย่าง 5.1 และทฤษฎีบท 4.2 (ข)

จะได้

$$\begin{aligned} & \sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{xyz}{(x+y+z)!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+2}{5} \frac{1}{n!} \\ &= \frac{1}{5!} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+2)(n+1)n(n-1)(n-2)}{n!} \\ &= \frac{1}{120} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^5}{dx^5} \left(\frac{x^{n+2}}{n!} \right) \Big|_{x=1} \\ &= \frac{1}{120} \frac{d^5}{dx^5} (x^2 e^x) \Big|_{x=1} \\ &= \frac{31e}{120} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง 5.3

หาค่าของอนุกรม

$$\sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{(xyz)^2}{(x+y+z)!}$$

□

วิธีทำ

โดยวิธีเดียวกับตัวอย่าง 5.1 และทฤษฎีบท 4.2 (ค) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \sum_{x=0}^{\infty} \sum_{y=0}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{(xyz)^2}{(x+y+z)!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{r=0}^3 \binom{3}{r} \binom{n+5-r}{8} \frac{1}{n!} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\binom{n+5}{8} + 3 \binom{n+4}{8} + 3 \binom{n+3}{8} + \binom{n+2}{8} \right) \frac{1}{n!} \\ &= \frac{1}{8!} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d^8}{dx^8} \left(\frac{x^{n+5} + 3x^{n+4} + 3x^{n+3} + x^{n+2}}{n!} \right) \Big|_{x=1} \\ &= \frac{1}{8!} \frac{d^8}{dx^8} ((x^5 + 3x^4 + 3x^3 + x^2)e^x) \Big|_{x=1} \\ &= \frac{773e}{1008} \end{aligned}$$

□

สรุปผลการวิจัย

ในบทความนี้ เราได้สร้างสูตรลดทอนสำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป (1.1) และ (1.2) โดยมีแนวคิดคือการจัดเรียงแต่ละพจน์ของอนุกรมหลายชั้นใหม่ให้เป็นผลบวกแนวตรง เราเริ่มจากการพิสูจน์เงื่อนไขที่เพียงพอที่จะทำให้วิธีจัดเรียงดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงการลู่เข้าหรือค่าของอนุกรม นั่นคือ ทฤษฎีบท 3.1 และทฤษฎีบท 3.2 โดยอาศัยเพียงความรู้พื้นฐานของอนุกรมชั้นเดียวในการพิสูจน์ จากนั้นจึงเลือกกฎเกณฑ์ที่เหมาะสมในการเรียงลำดับและจัดกลุ่ม เพื่อสร้างสูตรลดทอนทั่วไปสำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป (1.1) นั่นคือ ทฤษฎีบท 4.1 และเมื่อใช้สูตรลดทอนทั่วไปพร้อมกับเทคนิคการนับด้วยฟังก์ชันก่อกำเนิด จะทำให้ได้สูตรลดทอนสำหรับอนุกรมที่อยู่ในรูป (1.2) นั่นคือ ทฤษฎีบท 4.2 ผลลัพธ์ที่เราได้ในบทความนี้ นอกจากจะช่วยให้คำนวณค่าแฉ่งชัดของอนุกรมซ้อนกันหลายชั้นได้ง่ายขึ้นแล้ว ยังอาจนำไปประยุกต์กับ อนุกรมกำลังรูปนัย (formal power series) ที่มีหลายตัวแปรบางรูปแบบ ผู้สนใจสามารถดูรายละเอียดเกี่ยวกับอนุกรมกำลังรูปนัยได้ที่ (Haukkanen, 2019) และ (Niven, 1969)

References

Beeler, R. A. (2015). *How to count: An introduction to combinatorics and its applications*. Springer Cham.

Chuan-Chong, C., & Khee-Meng, K. (1992). *Principles and techniques in combinatorics*. World Scientific Publishing Company.

Furdui, O., & Trif, T. (2011). On the summation of certain iterated series. *Journal of Integer Sequence*, 14(6), Article 11.6.1.

Furdui, O. (2013). *Limits, series, and fractional part integrals: Problems in mathematical analysis*. Springer.

Haukkanen, P. (2019). Formal power series in several variables. *Notes on Number Theory and Discrete Math*, 25(4), 44-57.

Niven, I. (1969). Formal power series. *The American Mathematical Monthly*, 76(8), 871-889.

Qin, H., & Furdui, O. (2015). Three open problems and a conjecture. *Open Mathematic Journal*, 13(1), 729-736.

การจำแนกผู้ที่มีความเสี่ยงต่อโรคมะเร็งเต้านมด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ กรณีศึกษา: โรงพยาบาลสุทธาเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Classification of people at risk for breast cancer using decision tree algorithm, A case study of Suddhavej Hospital, Mahasarakham University

ชัยยันต์ สุขหมั่น^{1*} และ สุภาวดี วิชิตชาญ²

Chaiyarn Sukmun^{1*} and Supawadee Wichitchan²

Received: 16 August 2023 ; Revised: 19 September 2023 ; Accepted: 16 October 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ (decision tree algorithm) ในการจำแนกประเภทโรคมะเร็งเต้านม (breast cancer) และศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งเต้านม ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลเวชระเบียนของผู้ป่วยที่มีก้อนเนื้อบริเวณเต้านมจากคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่างปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2565 จากการทำควาสะอาดข้อมูลเหลือข้อมูลทั้งหมด 1,524 ระเบียน ซึ่งมีข้อมูลผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม จำนวน 1,343 ระเบียน และข้อมูลผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม จำนวน 181 ระเบียน จากผลการศึกษาพบว่าต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และ Random forest ให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) ค่อนข้างสูง แต่ค่าเกณฑ์ในการทำนาย AUC (area under ROC curve) ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการทำนายโมเดลไม่สามารถแยกกลุ่ม (class) ได้ดีพอ ซึ่งพบว่าข้อมูลที่ใช้ในการจำแนกคลาสมีจำนวนของคลาสมากน้อยไม่เท่ากัน (class imbalance) เพื่อแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการสุ่มเพิ่ม (oversampling) เพื่อเพิ่มจำนวนตัวอย่างในคลาสน้อยเพื่อให้จำนวนตัวอย่างในทุกคลาสเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน และวิธีสุ่มลด (undersampling) ลดตัวอย่างในคลาสมากเพื่อให้จำนวนตัวอย่างในทุกคลาสเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน พบว่าต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 และ C5.0 ให้ผลลัพธ์ไม่ต่างจากเดิมและผลลัพธ์ที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก ส่วน Random forest ให้ค่า AUC และค่าความระลึก (recall) ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 และ C5.0 ซึ่งสูงกว่าประมาณ 15-20%

คำสำคัญ: มะเร็งเต้านม, ต้นไม้ตัดสินใจ, ข้อมูลไม่สมดุล

Abstract

This research focused on evaluating the effectiveness of the Decision Tree Algorithm in classifying breast cancer, as well as investigating the associated risk factors. The study employed medical record data from breast mass patients at Mahasarakham University's Faculty of Medicine, spanning 2010 to 2022. The dataset, post-cleansing, comprised 1,524 records, with 1,343 representing low-risk breast cancer patients and 181 representing high-risk cases. The study indicates that the Decision Tree Algorithms, specifically C4.5, C5.0, and Random Forest, had substantial classification accuracy. However, their area under the ROC curve (AUC) values were relatively low due to insufficient class separation, which stems from class imbalance. This issue was addressed by employing oversampling to augment the minority class instances and undersampling to reduce the majority class instances. The outcomes revealed that both C4.5 and C5.0 Decision Trees yielded comparable results, while Random Forest demonstrated a superior AUC and recall, approximately 15-20% higher than C4.5 and C5.0.

Keywords: Breast cancer, decision tree, class-imbalance

¹ สาขาวิทยาการจัดการสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย

² อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย

¹ Department of Statistical Management Science, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand

² Lecturer, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand

* Corresponding author E-mail: 63010257003@msu.ac.th

บทนำ

มะเร็ง คือ กลุ่มของโรคที่เกิดเนื่องจากเซลล์ของร่างกายมีความผิดปกติ ที่ DNA หรือสารพันธุกรรม ส่งผลให้เซลล์มีการเจริญเติบโตมีการแบ่งตัวเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์รวดเร็วและมากกว่าปกติ ดังนั้น จึงอาจทำให้เกิดก้อนเนื้อผิดปกติ และในที่สุดก็จะทำให้เกิดการตายของเซลล์ในก้อนเนื้อนั้น เนื่องจากขาดเลือดไปเลี้ยงถ้าเซลล์พวกนี้เกิดอยู่ในอวัยวะใดก็จะเรียกชื่อ “มะเร็ง” ตามอวัยวะนั้น เช่น มะเร็งปอด, มะเร็งสมอง, มะเร็งเต้านม, มะเร็งปากมดลูก, มะเร็งเม็ดเลือดขาว และมะเร็งผิวหนัง เป็นต้น (สถาบันมะเร็งแห่งชาติ, 2563) “มะเร็งเต้านม” เป็นมะเร็งที่พบมากที่สุดเป็นอันดับ 1 ของผู้หญิงไทย และเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตอันดับต้น ๆ ในผู้หญิงทั่วโลก แนวโน้มคนไทยป่วยเป็นโรคมะเร็งสูงขึ้นทุกปีแต่ยังพบน้อยกว่าประเทศทางตะวันตกมาก โดยผู้หญิงไทยมีอัตราการพบมะเร็งประมาณ 40 คน ในสตรีวัยเจริญพันธุ์ 100,000 คน ซึ่งถ้าเทียบกับประเทศตะวันตกพบมะเร็งเต้านมได้มากกว่า 100 คน ในสตรีวัยเจริญพันธุ์ 100,000 คน ส่วนในผู้ชายก็พบมะเร็งเต้านมได้เช่นกันแต่ไม่บ่อยนัก โดยมีอุบัติการณ์ของโรคนี้น้อยกว่าผู้หญิงเกือบ 100 เท่า

สถานการณ์ของโรคมะเร็งในภาพรวมของประเทศไทย จากสถิติพบว่าโรคมะเร็งเป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับ 1 คิดเป็นร้อยละ 16 ของต้นเหตุการเสียชีวิตทั้งหมดสูงกว่าอันตรายการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุ และโรคหัวใจเฉียบพลัน 2 ถึง 3 เท่า หรือมีผู้เสียชีวิตจากโรคมะเร็งเฉลี่ย 8 รายต่อชั่วโมง ปัจจุบันโรคมะเร็งถือเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญของประเทศไทยและมีแนวโน้มอัตราการเกิดโรคมะเร็งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากสถิติพบว่ามีผู้ป่วยโรคมะเร็งรายใหม่ 139,206 คนต่อปี และในจำนวนนี้มีผู้เสียชีวิต 84,073 คนต่อปี สำหรับ 5 อันดับแรกของมะเร็งที่พบบ่อยที่สุด ได้แก่ 1. มะเร็งตับและท่อน้ำดี 2. มะเร็งเต้านม 3. มะเร็งปอด 4. มะเร็งลำไส้ใหญ่และทวารหนัก และ 5. มะเร็งปากมดลูก (ณัฐพร นันทวิวัฒนา, 2563)

การทำเหมืองข้อมูล (data mining) คือ การสืบค้นความรู้ที่เป็นประโยชน์และน่าสนใจบนฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (knowledge discovery from very large databases: KDD) (สายชล สันสมบุรณ์ทอง, 2560) หรือที่เรียกกันว่าการทำเหมืองข้อมูล เป็นวิธีการที่ใช้จัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่โดยจะนำข้อมูลที่มีอยู่มาวิเคราะห์แล้วดึงความรู้หรือสิ่งสำคัญออกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หรือทำนายสิ่งต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นซึ่งการค้นหาความรู้และความจริงที่แฝงอยู่ในข้อมูล (knowledge discovery) เป็นกระบวนการขุดค้นสิ่งที่น่าสนใจในกองข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อให้ได้สารสนเทศที่มีประโยชน์ (useful information) ที่เรายังไม่ทราบ (unknown data) โดยเป็นสารสนเทศที่มีเหตุผล (valid information) และสามารถนำไปใช้ได้ (actionable) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยการตัดสินใจในการทำเหมืองข้อมูลเป็น

กระบวนการที่สำคัญในการค้นหาความรู้จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่งมีนักวิจัยหลายคนได้นำกระบวนการทำเหมืองข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ในด้านต่าง ๆ อาทิ อุกฤษฏ์ ศรีสุข และจารี ทองคำ (2564) ทำการการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูล สำหรับพยากรณ์การเกิดโรค ซึ่งรวบรวมมาจากฐานข้อมูล UCI จำนวนทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล โดยนำเอาเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) มาใช้กับการทำเหมืองข้อมูล 5 เทคนิค ได้แก่ Decision Tree C4.5, Naïve Bayes, Neural Networks, Random Forest, Deep Learning มาทำการสร้างแบบจำลอง เพื่อการพยากรณ์การเกิดโรคมะเร็งเต้านม โรคมะเร็งปอด และโรคมะเร็งไทรอยด์ จากการทดลองพบว่า เทคนิค Decision Tree C4.5 เป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในการสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์โรคมะเร็งเต้านม และโรคมะเร็งไทรอยด์ โดยให้ค่าความถูกต้อง 99.86% และ 75.52% ตามลำดับ และเทคนิค Deep Learning เป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในการสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์โรคมะเร็งปอด โดยให้ค่าความถูกต้อง 77.47% รวมถึงงานวิจัยของ Nemade & Fegade (2023) ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในการทำนายมะเร็งเต้านม ได้แก่ Naïve Bayes, Logistic Regression, ซัพพอร์ต เวกเตอร์ แมชชีน (support vector machine), วิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (k-nearest neighbors), ต้นไม้ตัดสินใจ (decision tree), Random forest, อดาบัสต์ (adaboost) และเอ็กซ์จีบัสต์ (XGBoost) ถูกนำมาใช้กับชุดข้อมูลมะเร็งเต้านม พบว่าต้นไม้ตัดสินใจ (decision Tree) ให้มีค่าความถูกต้องสูงสุดถึง 97%

ดังนั้น งานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการนำเอาเทคนิคการทำเหมืองข้อมูลต้นไม้ตัดสินใจ (decision tree) มาใช้ในการจำแนกการเป็นโรคมะเร็งเต้านม ซึ่งเป็นโรคที่ยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด และเป็นกันมากทั่วโลกรวมถึงในประเทศไทย งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจในการจำแนกการเป็นโรคมะเร็งเต้านม โดยใช้ อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และ Random forest เพื่อหาปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งเต้านม โดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นชุดการเรียนรู้ (training data) และชุดข้อมูลทดสอบ (testing data) และวัดประสิทธิภาพโมเดลของแบบจำลองในแง่ของค่าความถูกต้อง (accuracy), เกณฑ์ในการทำนาย AUC (area under ROC curve) และค่าความระลึก (recall) ผลการวิจัยจะสามารถนำไปใช้สำหรับวางแผนการรักษาหรือให้คำแนะนำผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม และเมื่อหาแบบจำลอง (model) ที่มีความน่าเชื่อถือได้ก็สามารถที่จะนำข้อมูลผู้ที่เข้ารับการตรวจมะเร็งเต้านมมาเข้าในแบบจำลองเพื่อจะดูว่าผู้ที่เข้ารับการตรวจมีโอกาสที่จะเป็นโรคมะเร็งเต้านมหรือไม่ และถ้าผู้ป่วยอยู่ในกลุ่มที่เป็นมะเร็งเต้านมทางแพทย์จะได้ทำการตรวจอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

เพื่อที่จะได้ทำการรักษาได้ทันเวลาที่ อีกทั้งยังประชาสัมพันธ์ถึงสาธารณะชนเพื่อให้ความรู้เกี่ยวกับโรคมะเร็งเต้านม และบุคคลที่มีปัจจัยเสี่ยงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านมให้เข้ารับการตรวจโดยแพทย์ผู้เชี่ยวชาญได้อย่างทันการ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจในการจำแนกโรคมะเร็งเต้านม มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ (decision tree algorithm) ในการจำแนกประเภทโรคมะเร็งเต้านม (breast cancer) และศึกษาปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งเต้านม (breast cancer)

1. วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลทำโดยการส่งกระดาษหัดข้อมูลจากเวชระเบียนของผู้ป่วยที่มีก้อนเนื้อบริเวณเต้านม จากคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่างปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2565 มีตัวแปรอิสระ (independent variable) ทั้งหมด 10 ตัวแปร โดยเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพทั้งหมดดัง Table 1 พบว่าข้อมูลทั้งหมดมีค่าที่ขาดหายไป (missing value) 1.60 % จึงต้องทำการลบข้อมูลที่ขาดหายไป

Table 1 Independent Variable

ตัวแปร	กลุ่มตัวแปร (สัดส่วนข้อมูล)
1. เพศ (sex)	ชาย (0.79%), หญิง (99.21%)
2. อายุ (age)	อายุ 20-32 ปี (50.20%), อายุ 33-45 ปี (25.39%), อายุ 46-58 ปี (21.00%), อายุ 59-71 ปี (1.97%), อายุ 72-84 ปี (1.25%), อายุ 85-97 ปี (0.20%)
3. ดัชนีมวลกาย (body mass index: BMI)	<18.5 (3.54%), 18.5-22.9 (39.44%), 23.0-24.9 (20.28%), 25.0-29.9 (28.41%), ≥30 (8.33%)
4. สูบบุหรี่ (smoking)	สูบ (0.46%), ไม่สูบ (91.21%), ไม่ทราบ (8.33%)
5. ดื่มสุรา (binge)	ดื่ม (1.05%), ไม่ดื่ม (90.68%), ไม่ทราบ (8.27%)
6. อาการที่นำมาพบแพทย์ (chief complaint)	มีอาการ (30.97%), ไม่มีอาการ (10.37%), มาตามนัด (58.66%)
7. ก้อนหรือถุงน้ำ (mass or cyst)	Yes (48.82%), No (51.18%)
8. ความสมมาตรของเต้านมสองข้าง (asymmetries)	Yes (72.57%), No (27.43%)
9. แคลเซียม (calcification)	Yes (50.72%), No (49.28%)
10. โครงสร้างเต้านม (architectural distortion)	Yes (9.78%), No (90.22%)

2. วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 อัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5

วิธีการวิเคราะห์ต้นไม้ตัดสินใจแบบ C4.5 เป็นวิธีที่ใช้ในการสร้างและประเมินต้นไม้การตัดสินใจ (decision tree) ที่พัฒนาโดย Ross Quinlan ในปี 1986 ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้ค่า Information Gain ในการเลือก attribute ในการแยก

ออกจากข้อมูลทั้งหมด ซึ่งจะทำให้เหลือข้อมูลทั้งหมด 1,524 ระเบียน โดยผู้วิจัยได้ทำการแปลงข้อมูลอายุและดัชนีมวลกายจากตัวแปรเชิงปริมาณเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ เนื่องจากลดความซับซ้อนของอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจทำให้โมเดลง่ายต่อการทำนาย และลดโอกาสเกิดการเรียนรู้มากเกินไป (overfitting) รวมทั้งช่วยในการดูแลแนวโน้มของข้อมูลได้ง่ายขึ้น

ตัวแปรตาม (dependent variable) คือ ผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม และผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม

ผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (88.12%) หมายถึง ผู้ที่เข้ารับการตรวจแมมโมแกรมโดยมีค่า BIRADs Score คิดจากลักษณะรูปภาพที่เห็นซึ่งอยู่ในระดับคะแนน 0-3 (negative class)

ผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (11.88%) หมายถึง ผู้ที่เข้ารับการตรวจแมมโมแกรมโดยมีค่า BIRADs Score คิดจากลักษณะรูปภาพที่เห็นซึ่งอยู่ในระดับคะแนน 4-6 (positive class)

กลุ่มข้อมูล ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสำคัญของ attribute ในการลดความไม่แน่นอนของข้อมูล (entropy) ในกลุ่มย่อย ๆ ที่สร้างขึ้น

2. อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C5.0

วิธีการวิเคราะห์ต้นไม้ตัดสินใจแบบ C5.0 เป็นวิธีการสร้างและประเมินต้นไม้การตัดสินใจ (decision tree) ที่พัฒนาโดย Ross Quinlan ซึ่งเป็นตัวอัปเดตของ C4.5 ซึ่งนิยม

ใช้งานอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาที่มีข้อมูลหลายมิติและต้องการทำนายหรือตัดสินใจเกี่ยวกับหลายกลุ่มข้อมูล (multi-class decision-making) อย่างไรก็ตาม C5.0 มีประสิทธิภาพในการทำงานและให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า C4.5 ในบางกรณีเนื่องจากใช้เทคนิคการเลือกแบบผสมผสาน (ensemble selection) และคำนวณค่าย่อย (subset) ของกฎที่เป็นไปได้ให้มากขึ้น

3. วิธี Random forest

วิธี Random forest เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองทำนาย (predictive model) ที่มาจากเทคนิคของ ensemble learning โดยใช้หลาย ๆ ต้นไม้ตัดสินใจ (decision trees) แล้วรวมผลลัพธ์ของทุกต้นไม้เพื่อทำนายผลลัพธ์ที่ถูกต้องและเสถียรขึ้น โดย Random forest เป็นวิธีที่ดีในการแก้ปัญหาการเรียนรู้มากเกินไป (overfitting) และมีความแม่นยำสูงกว่าต้นไม้ตัดสินใจแบบเดี่ยวเมื่อใช้กับข้อมูลที่ซับซ้อนและมีความหลากหลาย

2.2 การแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล (solving the imbalanced data)

1. วิธีสุ่มเกิน (oversampling) เป็นการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อยให้มีจำนวนใกล้เคียงหรือเท่ากับจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนมาก ซึ่งการเพิ่มข้อมูลนั้นจะเพิ่มโดยการสุ่มเลือกจากข้อมูลเดิม ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการสุ่มแบบเป็นระบบ 30% และ 35% โดยผลการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อยให้มีจำนวนใกล้เคียงหรือเท่ากับจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนมาก

2. วิธีสุ่มลด (undersampling) เป็นการลดจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนมากให้มีจำนวนใกล้เคียงหรือเท่ากับจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อย ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการสุ่มแบบเป็นระบบโดยทำการสุ่มเพิ่ม 50% และทำการสุ่มลด 20% ซึ่งผลการลดจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนมากให้มีจำนวนใกล้เคียงหรือเท่ากับจำนวนข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อย

ในงานนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นสองส่วน โดยใช้ 75% ของข้อมูลเพื่อเป็นชุดข้อมูลการฝึก (training set) และ 25% ของข้อมูลเพื่อเป็นชุดข้อมูลทดสอบ (test set)

3. เกณฑ์ในการวัดประสิทธิภาพความแม่นยำ

3.1 เกณฑ์การวัดด้วยค่าความถูกต้อง

ในการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำ โดยใช้เกณฑ์ในการวัดด้วยค่าความถูกต้อง โดยคำนวณจากค่าในแนวเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์ความสับสน (confusion matrix: CM)

Table 2 Confusion Matrix 2 x 2

Predicted Values	Actual Values	
	Positive (1)	Negative (0)
Positive (1)	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Negative (0)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

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

โดยที่

ค่าความถูกต้อง (accuracy) คือ ค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 เมื่อค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือตัวแบบสามารถจำแนกประเภทได้ดีมาก

TP คือ ผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม และทำนายว่า เป็นผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (true positive)

FN คือ ผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม แต่ทำนายว่า เป็นผู้ที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (false negative)

TN คือ ผู้ที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม และทำนายว่า เป็นผู้ที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (true negative)

FP คือ ผู้ที่มีความเสี่ยงต่ำในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม แต่ทำนายว่า เป็นผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านม (false positive)

3.2 เกณฑ์ในการทำนาย Area Under the Curve (AUC) เป็นตัววัดประสิทธิภาพของโมเดลทำนาย (predictive model) ในงานการจำแนกประเภท (classification) AUC จะวัดพื้นที่ใต้เส้น Curve ที่เกิดจากการพล็อต ROC (receiver operating characteristic) ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง sensitivity และ specificity ของโมเดล ซึ่ง ROC Curve เป็นกราฟที่แสดงความสามารถของโมเดลในการแยกแยะ (discriminate) ระหว่างคลาสบวก (positive class) และคลาสลบ (negative class)

โดยที่

ค่าความไว (sensitivity) คือ ค่าของความถูกต้องในการพยากรณ์ของคลาสที่เกิดโรคต่อจำนวนทั้งหมดในกลุ่มของคลาสที่พยากรณ์ว่าเกิดโรค หรือเรียกอีกอย่างว่า True Positive Rate (TPR)

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

ค่าความจำเพาะ (specificity) คือ ค่าความถูกต้องในการพยากรณ์ของคลาสที่ไม่เกิดโรคต่อจำนวนทั้งหมดที่ไม่เกิดโรคจริง

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \tag{3}$$

False Positive Rate (FPR) หรือค่า 1-Specificity หมายถึงอัตราส่วนของ False Positives ต่อทั้งหมดที่เป็น Actual Negatives

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{4}$$

สามารถสรุปได้ดังเกณฑ์ต่อไปนี้
 0.50 ≤ AUC < 0.70 คือ ตัวแบบมีประสิทธิภาพต่ำ
 0.70 ≤ AUC < 0.80 คือ เกณฑ์มาตรฐานสำหรับตัวแบบส่วนใหญ่
 0.80 ≤ AUC < 0.90 คือ ตัวแบบทำงานได้ดี
 AUC > 0.90 คือ ตัวแบบทำงานได้ดีมาก

3.3 ค่าความระลึก (recall) คือความน่าจะเป็นที่โมเดลสามารถตรวจจับผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านมจากจำนวน ผู้ที่มีความเสี่ยงสูงในการเป็นโรคมะเร็งเต้านมทั้งหมดในข้อมูล

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{5}$$

ผลการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยคือ ข้อมูลจากเวชระเบียนของผู้ป่วยที่มีก้อนเนื้อบริเวณเต้านม จากคณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่างปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2565 เมื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (training set) และชุดทดสอบ (test set) โมเดลจะถูกฝึกอย่างต่อเนื่องในชุดฝึกและนำไปทดสอบบนชุดทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพ แต่ถ้าความแตกต่างในชุดฝึกและชุดทดสอบมีความแตกต่างกันมาก ๆ อาจทำให้โมเดลมีประสิทธิภาพในการทำนายที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าการพยากรณ์มีผลที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างในข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบและวัดประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และวิธี Random forest โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นสัดส่วน 75% สำหรับการฝึกและ 25% สำหรับการทดสอบ

Table 3 The accuracy, area under the curve (AUC), and recall values of the models using the decision tree algorithms C4.5, C5.0, and the Random Forest method, with data split into 75% for training and 25% for testing.

Implement	Accuracy	AUC	Recall
C4.5	0.8770	0.5463	0.0208
C5.0	0.8976	0.5000	0.0000
Random forest	0.8635	0.5271	0.0208
Oversampling 30% + C4.5	0.7203	0.6468	0.1719
Oversampling 30% + C5.0	0.6970	0.5391	0.0151
Oversampling 30% + Random forest	0.7394	0.7100	0.3721
Oversampling 35% + C4.5	0.6963	0.7200	0.3452
Oversampling 35% + C5.0	0.6639	0.5620	0.0807
Oversampling 35% + Random forest	0.7267	0.7648	0.4593
Combining Random Oversampling and Undersampling + C4.5	0.6540	0.7026	0.3629
Combining Random Oversampling and Undersampling + C5.0	0.6138	0.5538	0.0145
Combining Random Oversampling and Undersampling + Random forest	0.7142	0.7612	0.4571

จาก Table 3 แสดงค่าความถูกต้อง (accuracy), ค่าเกณฑ์ในการทำนาย AUC (area under ROC curve) และค่าความระลึก (recall) ของแบบจำลองที่ฝึกฝนด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และ Random forest โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นสัดส่วน 75% สำหรับการฝึกและ 25% สำหรับการทดสอบ พบว่า อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และวิธี Random forest ให้ค่าความถูกต้องค่อนข้างสูง แต่ค่าเกณฑ์ในการทำนาย AUC และค่าความระลึก (recall) ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการทำนายโมเดลไม่สามารถแยกกลุ่ม (class) ได้ดีพอ โมเดลอาจทำนายคลาสเดียวทั้งหมดหรือทำนายผิดพลาดในการแยกแยะกลุ่มของข้อมูลที่ซับซ้อน ผู้วิจัยทำการสุ่มข้อมูลเพิ่ม (oversampling) 30% และ 35% จะเห็นว่าค่า AUC และค่าความระลึก (recall) มากกว่าตอนที่ยังไม่ได้ทำการสุ่มเพิ่ม จากนั้นทำการสุ่มข้อมูลเพิ่มและลดข้อมูล (combining random oversampling and undersampling) พบว่าโมเดลที่ได้มีค่าความถูกต้อง, ค่า AUC และค่าความระลึก (recall) อยู่ในเกณฑ์ที่พึงพอใจและยอมรับได้ โดยวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือวิธี Random forest ร่วมกับการสุ่มข้อมูลเพิ่ม (oversampling) 35% จากนั้นผู้วิจัยทำการหาจำนวนต้นไม้, ความลึกของต้นไม้ และ k-fold cross-validation เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในแต่ละค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจำนวนต้นไม้ที่กำหนดคือ 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 และ 1000 ความลึกของต้นไม้ที่กำหนดคือ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 และ 19 ส่วนสุดท้าย k-fold cross-validation ที่กำหนดคือ 3, 5, 7, 9 และ 10 ซึ่งช่วยให้การประเมินมีความเสถียรและถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยลดผลกระทบจากการแบ่งข้อมูลแบบเฉพาะเจาะจง (specific) ที่อาจเกิดขึ้นในการแบ่งแยกแบบเดิม (train-test split) ที่ใช้เฉพาะชุดทดสอบ (test set) และชุดฝึก (train set) แบบเดียวกันเท่านั้น ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าที่ดีที่สุดคือ จำนวนต้นไม้เท่ากับ 200 ต้น, ความลึกของต้นไม้เท่ากับ 14 และ k-fold cross-validation เท่ากับ 7 (k=7) ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยในการควบคุมความซับซ้อนของโมเดลโดยเฉพาะความลึกของต้นไม้ การเลือกค่าความลึกที่เหมาะสมสามารถป้องกันโมเดลจากการเรียนรู้ข้อมูลเกินไป (overfitting) หรือการไม่เรียนรู้เพียงพอ (underfitting) ซึ่งจะช่วยให้โมเดลมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการทำนายข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน รวมทั้งการทดลองค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขั้นตอนการฝึกและประเมินโมเดลสามารถช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากรในกระบวนการพัฒนาโมเดลโดยไม่ต้องสร้างและทดลองทุก ๆ ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ หลังจากค้นพบค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดทำการฝึกและทดสอบโมเดล Random forest ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ และประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้ข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าโมเดลทำงานได้ดีที่สุด พบว่าให้ค่าความ

ถูกต้องในการทำนายคลาสต่าง ๆ บนชุดข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยเห็นมาก่อนเท่ากับ 72.27% ดัง Figure 1 และค่า AUC อยู่ที่ 0.76 ดัง Figure 2 และมีค่าความระลึก (recall) เท่ากับ 0.4756 ซึ่งจากการใช้จำนวนต้นไม้ทั้งหมด 200 ต้นในการสร้างแบบจำลอง Random forest ทำให้ได้ปัจจัยที่ส่งผลในการจำแนกโรคมะเร็งเต้านม 5 อันดับแรก ได้แก่ ความสมมาตรของเต้านมสองข้าง, มีอาการที่นำมาพบแพทย์, ก้อนหรือถุงน้ำ, แคลเซียม และโครงสร้างเต้านม ตามลำดับ

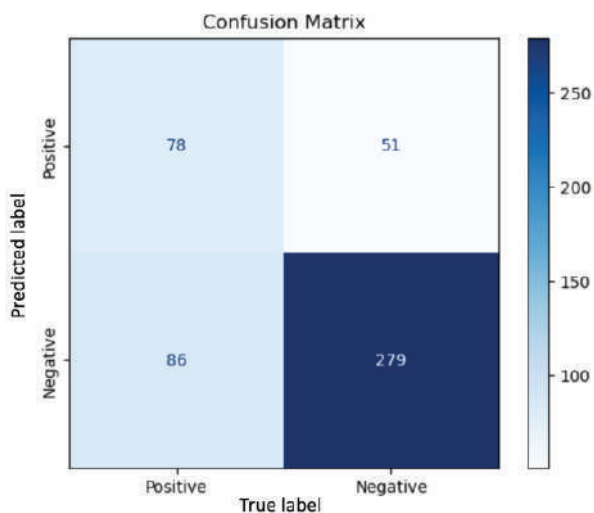


Figure 1 The Confusion Matrix of oversampling data at a 35% ratio using the Random Forest method with 7-fold cross-validation.

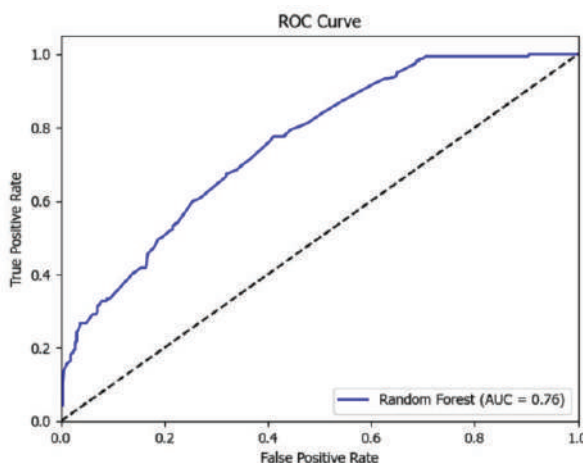


Figure 2 ROC curve for oversampling data at a 35% ratio using the Random Forest method with 7-fold cross-validation.

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจในการทำนายโรคมะเร็งเต้านมโดยการสังเคราะห์ข้อมูลจากเวชระเบียนของผู้ป่วยที่มีก้อนเนื้อบริเวณเต้านมจากคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่าง

ปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2565 ด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5, C5.0 และวิธี Random forest โดยพบว่าข้อมูลที่ใช้ในการจำแนกคลาสมีจำนวนของคลาสต่างกันมากน้อยไม่เท่ากัน (class imbalance) ซึ่งอาจทำให้โมเดลที่ได้สร้างขึ้นมีความสามารถในการทำนายคลาสที่มีจำนวนตัวอย่างมาก มากกว่าคลาสที่มีจำนวนตัวอย่างน้อย ๆ นำมาซึ่งผลลัพธ์ที่ไม่เสถียรและไม่แม่นยำในคลาสที่มีจำนวนตัวอย่างน้อย โดยปัญหานี้เกิดขึ้นได้ทั่วไปโดยเฉพาะข้อมูลทางการแพทย์ เนื่องจากการตรวจจับโรคหรือความเสี่ยงของโรคที่มีอัตราการเกิดต่อประชากรต่ำ ทำให้คลาสของผู้ป่วยหรือผู้ที่มีความเสี่ยงสูงมีจำนวนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคลาสของผู้ที่ไม่มีโรคหรือมีความเสี่ยงต่ำ เพื่อแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการสุ่มเพิ่ม (oversampling) เพื่อเพิ่มจำนวนตัวอย่างในคลาสที่น้อยเพื่อทำให้จำนวนตัวอย่างในทุกคลาสเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน และวิธีสุ่มลด (undersampling) ลดตัวอย่างในคลาสที่มีจำนวนมากลงเพื่อทำให้จำนวนตัวอย่างในทุกคลาสเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน รวมทั้งการแบ่งข้อมูล (split data) แบบต่าง ๆ ทำให้ค่าการพยากรณ์มีผลต่างกันเนื่องจากความแตกต่างในชุดข้อมูลที่ถูกใช้ในการสร้างและทดสอบโมเดล และความแตกต่างในแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากการศึกษาเปรียบเทียบจะเห็นว่า C4.5 และ C5.0 ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างจากเดิมและผลลัพธ์ที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก ส่วนวิธี Random forest ให้ค่า AUC ที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ C4.5 และ C5.0 ซึ่งสูงกว่าประมาณ 15-20% รวมทั้งค่าความระลึก (recall) ที่เพิ่มมากขึ้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของวิธี Random forest ใช้วิธีการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (ensemble) ของต้นไม้ตัดสินใจโดยการสุ่มข้อมูลและสุ่มคุณลักษณะ (feature) ที่ใช้ในการสร้างแต่ละต้นไม้ วิธีการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มช่วยลดความเสี่ยงในการเรียนรู้โมเดลจากข้อมูลที่ไม่สมดุล (class imbalance) และช่วยลดการเรียนรู้มากเกินไป (overfitting) โดยที่อัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 และ C5.0 อาจมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ อีกทั้งวิธี Random forest สร้างต้นไม้หลายต้นและรวมผลลัพธ์จากทุกต้นในการตัดสินใจ (voting) ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำของโมเดล ในทางตรงกันข้ามอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 และ C5.0 มีเพียงต้นไม้เดียวซึ่งมีความหลากหลายที่น้อยกว่า จากผลลัพธ์ที่ได้วิธี Random forest ร่วมกับการสุ่มข้อมูลเพิ่ม (oversampling) 35% เป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับชุดข้อมูลที่ทำการศึกษา จากนั้นผู้วิจัยทำการหาจำนวนต้นไม้ที่เหมาะสมและความลึกของต้นไม้พร้อมกับการทำ k-fold cross validation เพื่อดูค่าที่เปลี่ยนไป

ในแต่ละรอบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจำนวนต้นไม้ที่ดีที่สุดคือ 200 ต้น ความลึกของต้นไม้ คือ 14 และ k-fold ที่ดีที่สุดคือ 7 (k=7) สำหรับการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลในงานวิจัยนี้เป็นอีกหนึ่งแง่มุมที่สำคัญที่ช่วยให้โมเดลทำนายได้แม่นยำและเสถียร ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์โรคและการตรวจสอบความเสี่ยงในโดเมนทางการแพทย์ ซึ่งเป็นงานที่ความถูกต้องและน่าเชื่อถือมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การจัดการกับปัญหาความไม่สมดุลข้อมูลและการแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึกและชุดทดสอบเป็นปัจจัยสำคัญในการทำนาย การสุ่มข้อมูลเพิ่มและลดข้อมูลอาจช่วยปรับปรุงความแม่นยำของโมเดลแต่อาจมีผลให้ข้อมูลเสียหายและเพิ่มเวลาในการประมวลผล ควรพิจารณาความสมดุลของข้อมูลและการแบ่งข้อมูลให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างโมเดลที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลทางการแพทย์ ฉะนั้นการเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความต้องการของงานและลักษณะของข้อมูล และอาจจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเหมาะสมของข้อมูลและอัลกอริทึมในงานที่มีลักษณะแตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงพยาบาลสุทธาเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้อนุญาตให้ใช้ข้อมูลสำหรับนำมาศึกษาในงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ณัฐพร นันทวิวัฒนา. (2563). *มะเร็งเต้านม มะเร็งอันดับ 1 ของผู้หญิง*. โรงพยาบาล ศิริรินทร์. <https://www.sikarin.com/doctor-articles/โรคมะเร็งเต้านม-มะเร็งสถาบันมะเร็งแห่งชาติ>. (2561). *ทะเบียนมะเร็งระดับโรงพยาบาล พ.ศ. 2559*. พรทรีพีการพิมพ์.
- สายชล สันสมบุญธทอง. (2560). *การทำเหมืองข้อมูล เล่ม 1 การค้นหาความรู้จากข้อมูล*. จามจุรีโปรดักส์.
- อุกฤษณ์ ศรีสุข และจารี ทองคำ. (2564). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูลสำหรับอุบัติการณ์ของผู้ป่วย. *วารสาร วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 40(2), 157-163.
- Nemade, V., & Fegade, V. (2023). Machine learning techniques for breast cancer prediction. *Procedia Computer Science*, 218, 1314-1320.

การคำนวณของตัวแปรสำหรับตัวแกว่งกวัดฮาร์มอนิกอย่างง่ายคู่ควบกับสนามไฟฟ้าคงที่ผ่านวิธีการของชวิงเงอร์

Calculation of the propagator for a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field via Schwinger's method

ธณษา ชัยธนาปรีชา¹ และ นัฐพงษ์ ยงรัมย์^{2*}

Thanasa Chaithanapreecha¹ and Nattapong Yongram^{2*}

Received: 21 August 2023 ; Revised: 19 October 2023 ; Accepted: 3 November 2023

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ เราคำนวณตัวแปรไฟน์แมนสำหรับตัวแกว่งกวัดฮาร์มอนิกอย่างง่ายควบคู่กับสนามไฟฟ้าคงที่โดยใช้วิธีของชวิงเงอร์ ซึ่งอิงตามผลเฉลยของสมการไฮเซนเบิร์กสำหรับตำแหน่งและตัวดำเนินการโมเมนตัมแบบบัญญัติ ผลเฉลยดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อเขียนตัวดำเนินการแฮมิลตันตามอันดับของตัวดำเนินการตำแหน่ง $\hat{X}(0)$ และ $\hat{X}(t)$ การใช้อันดับตัวดำเนินการตามเวลาที่เหมาะสมควบคู่ไปกับเงื่อนไขย่อยและเงื่อนไขเริ่มต้นส่งผลให้ได้ตัวแปรดังกล่าว เราพบว่าตัวแปรที่ได้รับนั้นสอดคล้องกับตัวแปรที่ได้จากการใช้ปริพันธ์ตามวิถีของไฟน์แมนในงานของ Poon และ Muñoz (Poon & Muñoz 1999) เราคาดหวังว่าเทคนิคนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับนักศึกษาฟิสิกส์

คำสำคัญ: ปริพันธ์ตามวิถีของไฟน์แมน, ตัวแปร, วิธีการของชวิงเงอร์, สมการไฮเซนเบิร์ก

Abstract

In this article, we compute the Feynman propagator for a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field using Schwinger's method, which is based on the solution of the Heisenberg equations for the position and canonical momentum operators. Such solutions are then used to write the ordered Hamiltonian operator of the position operators $\hat{X}(0)$ and $\hat{X}(t)$. The utilization of proper operator ordering, along with subsidiary and initial conditions, results in the yield of such a propagator. We found that the propagator obtained is consistent with the one obtained using the Feynman path integral in the work of Poon and Muñoz (Poon & Muñoz 1999). We anticipate that this technique will be advantageous and widely recognized for physics students

Keywords: Feynman path integral, propagator, Schwinger's method, Heisenberg equation

¹ อาจารย์, สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก จ.ตาก

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

¹ Lecturer, Department of Science, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Tak E-mail: thanasa.c1986@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok E-mail: nattapongy@nu.ac.th

* Corresponding author: nattapongy@nu.ac.th

Introduction

The calculation of the propagator for a quantum mechanical system can be approached through various methods. Among these, the most prevalent method involves solving the time-dependent Schrödinger equation. Another technique entails constructing the matrix element of the unitary time operator within the spatial framework. These methodologies, along with others, necessitate a profound knowledge of the Hamiltonian operator. It is fair to say that the Feynman path integral (Feynman, 1948) is a powerful and elegant approach for computing the propagator. This method harnesses the Lagrangian formalism, transforming position and momentum from operators into ordinary classical quantities, such as in the famous textbook by Feynman and Hibbs (Feynman & Hibbs, 1965), where they elucidated the computation of propagators for harmonic oscillators by using the Feynman path integral. Recently Poon and Muñoz (Poon & Muñoz, 1999) employed this technique to compute the non-relativistic propagator for a general quadratic Lagrangian—natural point of departure if one intends to do perturbation theory in the path integral approach. They also applied this approach to calculate the propagator of a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field. A recent research paper by Chaithanapreecha and Yongram (Chaithanapreecha & Yongram, 2023) used the Feynman path integral to calculate the propagator of a damped harmonic oscillator coupled to an electric field. And so on (Cohem, 1998; Brown & Zhang, 1994; Farina, Maneschy & Neves, 1993; Holstein, 1985; Mannheim, 1988).

Moreover, Schwinger (1951) developed a beautiful and powerful method, which is the so-called Schwinger's method (SM), in the context of relativistic quantum field theory to treat effective actions in quantum electrodynamics (QED). However, Schwinger's approach is highly suited for calculating non-relativistic propagators, such as the recent work done by Urrutia and Hernández (1984) using Schwinger's action principle to calculate the Feynman propagator for a damped harmonic oscillator with a time-dependent frequency under a time-dependent external force. To the best of our understanding, subsequent to that time, only a limited number of papers have been authored utilizing this approach, namely: in 1986, Urrutia and Manterola (Urrutia & Manterola, 1986)

used it in the problem of an anharmonic charged oscillator under a magnetic field; throughout the same calendar year, Horing, Cui, and Fiorenza (Horing, Cui, & Fiorenza, 1986) applied Schwinger's method to obtain the Green function for crossed time-dependent electric and magnetic fields; in 1993, Fararina & Segui-Santonja (1993) published a calculation of the Feynman propagator for a harmonic oscillator with a time-dependent frequency by using Schwinger's method. Rabello & Farina (1995) used a gauge covariant operator technique which led to a deduced path integral for a charged particle in an arbitrary stationary magnetic field, verifying the midpoint-rule for the discrete form of the interaction term with the vector potential. For evaluating the small time propagator they used a method developed by Schwinger; Barone, Boschi-Filho & Farina (2003) used Schwinger's method to obtain the Feynman propagator for the nonrelativistic harmonic oscillator; Aragão, Boschi-Filho, Farina, and Barone (Aragão, Boschi-Filho, Farina & Barone, 2007) reconsidered the Feynman propagator of two non-relativistic systems: a charged particle in a uniform magnetic field and a charged harmonic oscillator in a uniform magnetic field by using Schwinger's method. Instead of solving the Heisenberg equations for the position and the canonical momentum operator, they applied this method by solving the Heisenberg equations for the gauge invariant operators.; Pepore, Kirdmanee, and Sukbot (2017) and Thongpool & Pepore (2022) derived the propagators for a damped harmonic oscillator with time-dependent mass and frequency and a time-dependent inverted harmonic oscillator by using Schwinger's method as well.

As previously stated, Schwinger's approach is commonly employed to derive the propagator of non-relativistic systems. However, it is far less widely utilized compared to the Feynman path integral. To confirm that Schwinger's method is extremely powerful also, our purpose in this paper is to provide the reader with the propagator for a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field that is computed in a straightforward way by Schwinger's method, which is based on the solution of the Heisenberg operator equations of motion. The use of proper operator ordering and the subsidiary and initial conditions yields the

propagator for such a system. We then compare the propagator obtained with the one obtained using the Feynman path integral in the work of Poon and Muñoz (1999).

To establish our notation, we write the Feynman propagator for a time independent nonrelativistic system with Hamiltonian operator \hat{H} in the form:

$$K(x_b, x_a; \tau) = \theta(\tau) \langle x_b | \hat{U}(\tau) | x_a \rangle \tag{1}$$

where $\hat{U}(\tau)$ is the time evolution operator:

$$\hat{U}(\tau) = \exp(-i\hat{H}\tau) \tag{2}$$

and $\theta(\tau)$ is the step function defined by

$$\theta(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{if } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{if } \tau < 0 \end{cases} \tag{3}$$

First, observe that for $\tau > 0$, Eq.(1) leads to the differential equation for the Feynman propagator:

$$i \frac{\partial}{\partial \tau} K(x_b, x_a; \tau) = \langle x_b | \hat{H} \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \hat{H} \tau\right) | x_a \rangle \tag{4}$$

By using the general relation between operators in the Heisenberg and Schrödinger pictures,

$$\hat{O}_H(t) = e^{i\hat{H}t/\hbar} \hat{O}_S e^{-i\hat{H}t/\hbar} \tag{5}$$

it is not difficult to show that if $|x\rangle$ is an eigenvector of the operator \hat{X} with eigenvalue x , then it is also true that

$$\hat{X}(t) |x, t\rangle = x |x, t\rangle \tag{6}$$

where

$$\hat{X}(t) = e^{i\hat{H}t/\hbar} \hat{X} e^{-i\hat{H}t/\hbar} \tag{7}$$

and $|x, t\rangle$ is defined as

$$|x, t\rangle = e^{i\hat{H}t/\hbar} |x\rangle \tag{8}$$

Using this notation, the Feynman propagator can be written as:

$$K(x_b, x_a; \tau) = \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle \tag{9}$$

where

$$\hat{X}(\tau) |x_b, \tau\rangle = x_b |x_b, \tau\rangle \tag{10a}$$

$$\hat{X}(0) |x_a, 0\rangle = x_a |x_a, 0\rangle \tag{10b}$$

The differential equation for the Feynman propagator, Eq.(4), takes the form

$$i \frac{\partial}{\partial \tau} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle = \langle x_b, \tau | \hat{H} | x_a, 0 \rangle \quad (\tau > 0) \tag{11}$$

The form of Eq. (11) is very suggestive and is the starting point for the very elegant operator method introduced by Schwinger. The main idea is to calculate the matrix element on the right-hand side of Eq. (11) by writing \hat{H} in terms of the operators $\hat{X}(\tau)$ and $\hat{X}(0)$, appropriately ordered. Schwinger's method can be summarized by the following steps:

(i) Solve the Heisenberg equations for the operators $\hat{X}(\tau)$ and $\hat{P}(\tau)$, which are given by:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{X}(t) = [\hat{X}(t), \hat{H}], i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{P}(t) = [\hat{P}(t), \hat{H}] \tag{12}$$

Equations (12) follow directly from Eq. (5).

(ii) Use the solutions obtained in step (1) to rewrite the Hamiltonian operator \hat{H} as a function of the operators $\hat{X}(0)$ and $\hat{X}(\tau)$ ordered in such a way that in each term of \hat{H} , the operator $\hat{X}(\tau)$ must appear on the left-hand side, while the operator $\hat{X}(0)$ must appear on the right-hand side. This ordering can be done easily

with the help of the commutator $[\hat{X}(0), \hat{X}(\tau)]$ (see Eq. (25)). We shall refer to the Hamiltonian operator written in this way as the ordered Hamiltonian operator $\hat{H}_{ord}(\hat{X}(\tau), \hat{X}(0))$. After this ordering, the matrix element on the right-hand side of Eq. (11) can be readily evaluated:

$$\langle x_b, \tau | \hat{H} | x_a, 0 \rangle = \langle x_b, \tau | \hat{H}_{ord}(\hat{X}(\tau), \hat{X}(0)) | x_a, 0 \rangle \tag{13}$$

$$\equiv H(x_b, x_a; \tau) \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle$$

where we have defined the function H . The latter is a c-number and not an operator. If we substitute this result in Eq. (11) and integrate over τ , we obtain:

$$\langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle = C(x_b, x_a) \exp\left(-i \int^\tau d\tau'\right) \times H(x_b, x_a; \tau') \tag{14}$$

where $C(x_b, x_a)$ is an arbitrary integration constant.

(iii) The last step is devoted to the calculation of $C(x_b, x_a)$. Its dependence on x_b and x_a can be determined by imposing the following conditions:

$$\langle x_b, \tau | \hat{P}(\tau) | x_a, 0 \rangle = -i \frac{\partial}{\partial x_b} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle \tag{15a}$$

$$\langle x_b, \tau | \hat{P}(0) | x_a, 0 \rangle = +i \frac{\partial}{\partial x_a} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle \tag{15b}$$

These equations come from the definitions in Eq. (10) together with the assumption that the usual commutation relations hold at any time:

$$[\hat{X}(\tau), \hat{P}(\tau)] = [\hat{X}(0), \hat{P}(0)] = i \tag{16}$$

After using Eq. (15), there is still a multiplicative factor to be determined in $C(x_b, x_a)$. This can be done simply by imposing the propagator initial condition:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0^+} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle = \delta(x_b - x_a) \tag{17}$$

Derivation of the propagator

We start the calculation of the propagator for a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field by using the Schwinger method. The Hamiltonian operator of this system can be written as

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2(\tau)}{2m} + \frac{1}{2} m\omega^2 \hat{X}^2(\tau) - qE\hat{X}(\tau) \tag{18}$$

where m is the mass of the particle, ω is natural frequency of oscillation, q is an electric charged, and E is an electric field. We rewrite Eq. (18) as the time-independent Hamiltonian operator, it reads

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2(0)}{2m} + \frac{1}{2} m\omega^2 \hat{X}^2(0) - qE\hat{X}(0) \tag{19}$$

despite the fact that the operator and are explicitly time dependent. It is matter of choice whether to work with the Hamiltonian operator given by Eq.(18) or by Eq.(19). For simplicity, we choose the latter.

As stated in step (i), we start by writing down the corresponding Heisenberg equations:

$$\frac{d}{dt} \hat{X}(t) = \frac{\hat{P}(t)}{m} \tag{20a}$$

$$\frac{d}{dt} \hat{P}(t) = -m\omega^2 \hat{X}(t) + qE \tag{20b}$$

whose solutions permit us to write for $t = \tau$ that

$$\hat{X}(\tau) = \hat{X}(0) \cos \omega\tau + \frac{\hat{P}(0)}{m\omega} \sin \omega\tau - \frac{2qE}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \tag{21}$$

For later convenience, we also write the corresponding expression for $\hat{P}(\tau)$:

$$\hat{P}(\tau) = -m\omega \hat{X}(0) \sin \omega\tau + \hat{P}(0) \cos \omega\tau + \frac{qE}{\omega} \sin \omega\tau \tag{22}$$

To complete step (ii) we need to rewrite $\hat{P}(0)$ in terms of $\hat{X}(\tau)$ and $\hat{X}(0)$, which can be done directly from Eq.(21):

$$\hat{P}(0) = \frac{m\omega}{\sin \omega\tau} \left[\hat{X}(\tau) - \hat{X}(0) \cos \omega\tau - \frac{2qE}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \right] \quad (23)$$

If we substitute this result into Eq. (19), we obtain

$$\begin{aligned} \hat{H} = & \frac{m\omega^2}{2\sin^2 \omega\tau} \left[\hat{X}^2(\tau) + \hat{X}^2(0) \cos^2 \omega\tau \right. \\ & - \hat{X}(0)\hat{X}(\tau) \cos \omega\tau - \hat{X}(\tau)\hat{X}(0) \cos \omega\tau \\ & + \frac{4qE\hat{X}(0)}{m\omega^2} \cos \omega\tau \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \\ & - \frac{4qE\hat{X}(\tau)}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} + \frac{4q^2E^2}{m^2\omega^4} \sin^4(\omega\tau/2) \left. \right] \\ & + \frac{1}{2} m\omega^2 \hat{X}^2(0) - qE\hat{X}(0) \end{aligned} \quad (24)$$

Note that the third term in Eq. (24) is not written in the appropriate order. By using the commutation relation

$$\begin{aligned} [\hat{X}(0), \hat{X}(\tau)] = & [\hat{X}(0), \hat{X}(0) \cos \omega\tau + \frac{\hat{P}(0)}{m\omega} \sin \omega\tau \\ & - \frac{2qE}{m\omega^2} \sin^2(\omega\tau/2)] \\ = & \frac{i}{m\omega} \sin \omega\tau \end{aligned} \quad (25)$$

It follows immediately that

$$\hat{X}(0)\hat{X}(\tau) = \hat{X}(\tau)\hat{X}(0) + \frac{i}{m\omega} \sin \omega\tau \quad (26)$$

If we substitute Eq. (26) into Eq. (24), we obtain the ordered Hamiltonian:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{ord} = & \frac{m\omega^2}{2\sin^2 \omega\tau} \left[\hat{X}^2(\tau) + \hat{X}^2(0) - 2\hat{X}(\tau)\hat{X}(0) \cos \omega\tau \right. \\ & + \frac{4q^2E^2}{m^2\omega^4} \sin^4 \frac{\omega\tau}{2} - \frac{4qE\hat{X}(0)}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \\ & - \frac{4qE\hat{X}(\tau)}{m\omega^2} \sin^2(\omega\tau/2) \left. \right] - \frac{i}{2} \frac{\omega}{\omega} \cot \omega\tau \end{aligned} \quad (27)$$

Once the Hamiltonian operator is appropriately ordered, we can find the function $H(x_b, x_a; \tau)$ directly from its definition, given by Eq. (13):

$$\begin{aligned} H(x_b, x_a; \tau) = & \frac{\langle x_b, \tau | \hat{H} | x_a, 0 \rangle}{\langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle} \\ = & \frac{m\omega^2}{2} \left[(x_b^2 + x_a^2) \csc^2 \omega\tau - 2x_b x_a \cot \omega\tau \csc \omega\tau \right. \\ & + \frac{4q^2E^2}{m^2\omega^4} \sin^4 \frac{\omega\tau}{2} \csc^2 \omega\tau - \frac{4qEx_a}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \csc^2 \omega\tau \\ & \left. - \frac{4qEx_b}{m\omega^2} \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \csc^2 \omega\tau \right] - \frac{i}{2} \frac{\omega}{\omega} \cot \omega\tau \end{aligned} \quad (28)$$

By using Eq. (14), we can express the propagator in the following form:

$$\begin{aligned} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle = & C(x_b, x_a) \exp \left\{ -i \int_0^\tau d\tau' \left[\frac{m\omega^2}{2} \right. \right. \\ & \times \left((x_b^2 + x_a^2) \csc^2 \omega\tau' - 2x_b x_a \cot \omega\tau' \csc \omega\tau' \right) \\ & + \frac{4q^2E^2}{m^2\omega^4} \sin^4 \frac{\omega\tau'}{2} \csc^2 \omega\tau' - \frac{4qE(x_a + x_b)}{m\omega^2} \\ & \left. \left. \times \sin^2 \frac{\omega\tau'}{2} \csc^2 \omega\tau' - \frac{i}{2} \frac{\omega}{\omega} \cot \omega\tau' \right] \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

The integration over τ' in Eq. (29) can be readily evaluated:

$$\begin{aligned} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle = & \frac{C(x_b, x_a)}{\sqrt{\sin \omega\tau}} \exp \left\{ \frac{im\omega}{2 \sin \omega\tau} \left((x_b^2 + x_a^2) \right. \right. \\ & \times \cos \omega\tau - x_b x_a \left. \left. \right) + \frac{iqE}{2 \omega \sin \omega\tau} \right. \\ & \times \left[4 \left(x_b + x_a - \frac{qE}{m\omega^2} \right) \sin^2 \frac{\omega\tau}{2} \right. \\ & \left. \left. + \frac{qE\tau}{m\omega} \sin \omega\tau \right] \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

where $C(x_b, x_a)$ is an arbitrary integration constant to be determined according to step (iii).

The determination of $C(x_b, x_a)$ is done with the aid of Eqs. (15) and (17). However, we need to rewrite the operators $\hat{P}(0)$ and $\hat{P}(\tau)$ in terms of the operators $\hat{X}(\tau)$ and $\hat{X}(0)$, appropriately ordered. For $\hat{P}(0)$ this task has already been done (see Eq.(23)), and for $\hat{P}(\tau)$ we find after substituting Eq. (23) into Eq. (22):

$$\begin{aligned} \hat{P}(\tau) = & m\omega \cot \omega\tau \left[\hat{X}(\tau) - \hat{X}(0) \cos \omega\tau \right] \\ & - m\omega \hat{X}(0) \sin \omega\tau + \frac{qE}{\omega} \sin \omega\tau \end{aligned} \quad (31)$$

Then, by inserting Eqs. (31) and (30) into Eq. (15a) it is not difficult to show that:

$$\frac{\partial C(x_b, x_a)}{\partial x_b} = 0 \tag{32}$$

Analogously, by substituting Eqs.(23) and (30) into Eq. (15b) we have that $\partial C(x_b, x_a)/\partial x_a = 0$. The last two relations tell us that $C(x_b, x_a) = C$, that is, it is a constant independent of x_b and x_a . In order to determine the value of C , we first take the limit $\tau \rightarrow 0^+$ on $\langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle$. If we use Eq.(30), we find that

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0^+} \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle &= \lim_{\tau \rightarrow 0^+} \frac{C}{\sqrt{\omega \tau}} \exp\left[\frac{im}{2\tau}(x_b - x_a)^2\right] \\ &= C \sqrt{\frac{2\pi i}{m\omega}} \delta(x_b - x_a) \end{aligned} \tag{33}$$

If we compare this result with the initial condition, Eq. (17), we obtain $C = \sqrt{m\omega / 2\pi i}$. By substituting this result for C into Eq.(30), we obtain the desired Feynman propagator for the harmonic oscillator:

$$\begin{aligned} K(x_b, x_a; \tau) &= \langle x_b, \tau | x_a, 0 \rangle \\ &= \sqrt{\frac{m\omega}{2\pi i \hbar \sin \omega \tau}} \exp\left\{ \frac{im\omega}{2\hbar \sin \omega \tau} [(x_b^2 + x_a^2) \cos \omega \tau \right. \\ &\quad \left. - 2x_b x_a] + \frac{iqE}{2\omega \sin \omega \tau} \left[4(x_b + x_a - \frac{qE}{m\omega^2}) \sin^2 \frac{\omega \tau}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{qE\tau}{m\omega} \sin \omega \tau \right] \right\} \end{aligned} \tag{34}$$

Conclusions

We found the Feynman propagator of a simple harmonic oscillator connected to a constant electric field using Schwinger’s method, which is usually used in quantum field theory but also works well for non-relativistic quantum mechanical problems, even though they don’t happen very often. Schwinger’s method is based on the solution of the Heisenberg equations for the position and canonical momentum operators. Such solutions are then used to write the ordered Hamiltonian operator of the position operators $\hat{X}(0)$ and $\hat{X}(t)$. The utilization of proper operator ordering, along with subsidiary and initial conditions, results in the yield of such a propagator. We found that the propagator obtained is consistent with the one obtained using the Feynman path integral in the

work of Poon and Muñoz (1999). Schwinger’s method is known for its strong focus on operator formalism and its applications in quantum field theory as well as non-relativistic quantum theory, whereas the path integral method is renowned for its probabilistic interpretation and its broad applicability to various quantum systems, making it an extremely powerful tool in both theoretical and computational physics. We hope that this pedagogical paper may be useful for undergraduate as well as graduate students and that a simple harmonic oscillator coupled to a constant electric field may enlarge the small list of non-relativistic problems that have been treated by such a powerful and elegant method.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Department of Science, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak and the Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University for their assistance in providing necessary facilities.

References

Feynman, R. P. (1948). Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 20(2), 367-387.

Feynman, R. P., Hibbs, A. R. & Styer, D. F. (2010). *Quantum mechanics and path integrals*. Dover.

Poon, K. & Muñoz, G. (1999). Path integrals and propagators for quadratic Lagrangians in three dimensional. *American Journal of Physics*, 67(6), 547-549.

Chaithanapreecha, T. & Yongram, N. (2023). The propagator for a damped harmonic oscillator coupled to an electric field. *6th National Conference (Graduate School Conference 2023)*. (pp. 90-98). Suan Sunandha Rajabhat University.

Cohen, S. M. (1998). Path integral for the quantum harmonic oscillator using elementary methods. *American Journal of Physics*, 66, 537-540.

Brown, L. S. & Zhang, Y. (1994). Path integral for the motion of a particle in a linear potential. *American Journal of Physics*, 62, 806-808

- Farina, C., Maneschy, M. & Neves, C. (1993). An alternative approach for the propagator of a charged harmonic oscillator in a magnetic field. *American Journal of Physics*, 61, 636-640.
- Holstein, B. R. (1985). Forced harmonic oscillator: A path integral approach. *American Journal of Physics*, 53, 723-725.
- Mannheim, P. D. (1988). The physics behind path integrals in quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 51, 328-334.
- Schwinger, J. (1951). Gauge invariance and vacuum polarization. *Physical Review*, 82, 664-679.
- Urrutia, L. F. & Hernández, E. (1984). Calculation of the propagator for a time-dependent damped, forced harmonic oscillator using the Schwinger action principle. *International Journal of Theoretical Physics*, 23(12), 1105-127.
- Urrutia, L.F. & Manterola, C. (1986). Propagator for the anisotropic three-dimensional charged harmonic oscillator in a constant magnetic field using the Schwinger action principle. *International Journal of Theoretical Physics*, 25, 75-88.
- Horing, N. J. M., Cui, H. L. & Fiorenza, G. (1986). Nonrelativistic Schrödinger Green's function for crossed time-dependent electric and magnetic fields. *Physical Review A*, 34, 612-615.
- Farina, C. & Segui-Santonja, A. (1993). Schwinger's method for a harmonic oscillator with a time-dependent frequency. *Physics Letters A*, 184(1), 23-28.
- Rabello, S. J. & Farina, C. (1995). Gauge invariance and the path integral. *Physical Review A*, 51, 2614.
- Barone, F.A., Boschi-Filho, H. & Farina, C. (2003). Three methods for calculating the Feynman propagator. *American Journal of Physics*, 71, 483-491.
- Aragão, A., Boschi-Filho, H., Farina, C. & Barone, F. A. (2007). Non-Relativistic propagators via Schwinger's method. *Brazilian Journal of Physics*, 37(4), 1260-1268.
- Pepore, S., Kirdmanee, B. & Sukbot, B. (2017). Schwinger Method for Damped Mechanical Systems. *Journal of Science and Technology Thonburi University*, 1(1), 42-50.
- Thongpool, V. & Pepore, S. (2022). Propagators for a damped harmonic oscillator with time-dependent mass and frequency and a time-dependent inverted harmonic oscillator. Social Science Research Network.

ชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามและระบบสมาร์ททอตุณิยมวิทยาเพื่อการเกษตร Automatic in-field weather stations and smart Met4Agriculture system

พัชรา เพชรวิโรจน์ชัย^{1*}, ทัชนันท์ แดงกนิษฐ สิทธีวรนนท์², เกษรินทร์ ห่านประเสริฐ³, วัชรพล ทรัพย์วิวัฒน์⁴,
โกสินทร์ นวลจ้อย⁵, ปราโมทย์ สีซ้อง⁵, เขมิกา พงษ์เมธี⁵ และ สมปราชญ์ ศรีถกล⁶
Patchara Petvirojchai¹, Touchanun Dangkanit Sitthiworanun², Kesrin Hanprasert³,
Watcharapol Subwat⁴, Kosin Nualjuice⁵, Pramote Seekhong⁵, Khemika Pongmethee⁵
and Somprat Srithagon⁶

Received: 15 August 2023 ; Revised: 7 November 2023 ; Accepted: 29 November 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามสำหรับติดตั้งในแปลงเกษตรที่มีสภาพอากาศและชนิดพืชแตกต่างกันและแสดงผลการตรวจวัดในระบบสมาร์ททอตุณิยมวิทยาเพื่อการเกษตร (Met4Agriculture) โดยออกแบบชุดตรวจอากาศอัตโนมัติให้การทำงานของอุปกรณ์ภายในใช้พลังงานแสงอาทิตย์และประกอบด้วยเซนเซอร์ 5 ชนิด คือ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความเข้มแสง ความชื้นในดินที่ระดับความลึกจากผิวดิน 10 เซนติเมตร โดยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความชื้นในดินผ่านการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือจากกรมอุตุนิยมวิทยาและความเข้มแสงผ่านการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือจากมหาวิทยาลัยศิลปากร ผลการสอบเทียบพบว่าเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 องศาเซลเซียส และ 1-3 %RH ตามลำดับ เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝนมีความคลาดเคลื่อน + 3 มิลลิเมตร เซนเซอร์วัดความเข้มแสงวัดค่าความสว่างน้อยกว่าค่าตรวจวัดจริง 1.17 เท่า เซนเซอร์วัดความชื้นในดินมีค่าความชื้นที่วัดได้กับปริมาณความชื้นในดินที่คำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองเข้าใกล้ 1 นอกจากนี้ได้ออกแบบโปรแกรมทำงานบนลินีโก (LILYGO) และพัฒนาโปรแกรม Met4Agriculture โดยระบบจะเชื่อมต่อข้อมูลจากระบบไอโอที เน็ตพาย (IoT NETPIE) เพื่อนำข้อมูลตรวจวัดจากสถานีมาแสดงผล โปรแกรมจะอ้างอิงจุดสถานีตรวจวัดจาก id และ token จากระบบ NETPIE และพัฒนาต่อยอดเป็น Met4Agriculture Application รองรับทุกแพลตฟอร์ม สามารถแสดงค่าข้อมูลที่บันทึกไว้ในอดีตเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในฤดูกาลต่างๆ และกำหนดค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ในแต่ละพารามิเตอร์ที่จะมีผลกระทบต่อพืชผลทางการเกษตรในแต่ละช่วงฤดูได้

ผลการวิจัยนี้สามารถพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติต้นแบบต้นทุ่นต่ำที่มีความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดไม่แตกต่างจากเครื่องมือมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อนำชุดตรวจอากาศอัตโนมัติที่พัฒนาแล้วไปติดตั้งในพื้นที่ทั้ง 5 ภาคของประเทศไทย สามารถรับ-ส่งและแสดงผลข้อมูลการตรวจวัดออนไลน์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันและระบบสมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการไอโอเอสและแอนดรอยด์แบบเรียลไทม์ได้อย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: ชุดตรวจอากาศอัตโนมัติ, โปรแกรม Met4Agriculture, ระบบ IoT NETPIE, เซนเซอร์

¹ ผู้อำนวยการศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน, ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ถนนมะลิวัลย์ ตำบลบ้านเปิด อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

² นักอุตุนิยมวิทยา ชำนาญการพิเศษ, ส่วนอากาศการบินสุราษฎร์ธานี ตำบลหัวเตย อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84130

³ นักอุตุนิยมวิทยา ชำนาญการพิเศษ, กรมอุตุนิยมวิทยา 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

⁴ วิศวกร, กองเครื่องมืออุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

⁵ นายช่างไฟฟ้า, กองเครื่องมืออุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

⁶ นักอุตุนิยมวิทยา, กรมอุตุนิยมวิทยา 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

¹ Director of the Upper Northeastern Meteorological Center, Tel 043 468 224, e-mail: patchara@hotmail.com, patchara@tmd.go.th

² Senior Meteorologist, e-mail: tochanun@gmail.com

³ Senior Meteorologist, Tel 02 3991423, e-mail: kesrin_han@hotmail.com,

⁴ Professional Engineer, Tel 0-2399-4568-74 e-mail: watcharapo2003@gmail.com

⁵ Experienced Electrician, Tel 0-2399-4568-74, e-mail: wanasin9800@gmail.com, e-mail: admote.ps@gmail.com, e-mail: tae_taladplu028@hotmail.com

⁶ Meteorologist, e-mail: srithagon.somprat@gmail.com

* Corresponding author e-mail: patchara@hotmail.com, patchara@tmd.go.th

Abstract

The purpose of the research was to develop an automatic in-field weather station specifically for use in agricultural environments. The station was set up for use in a variety of weather conditions and research plant species. To present the data collected, a smart system named Met4Agriculture was developed. Five sensors were included in the solar powered in-field weather station design: light intensity, temperature, relative humidity, rainfall, and soil moisture measured at a depth of 10 centimeters. The Thai Meteorological Department calibrated sensors for temperature, relative humidity, rainfall, and soil moisture; Silpakorn University was responsible for the calibration of the light intensity sensor. The calibration results showed that temperature and relative humidity sensors had an accuracy deviation of approximately 1 °C and 1-3 %RH, respectively. The variance of the rainfall sensor was ± 3 mm. The variance of the rainfall sensor was ± 3 mm. The light intensity sensor had a deviation 1.17 times less than the actual measured value. The soil moisture sensor's measured moisture level trended in the same direction as the calculated soil moisture level, with a coefficient of correlation between the two values close to 1. Additionally, a program was designed to run on the LILYGO system and develop the Met4Agriculture program. The system could connect data from the IoT NETPIE system to display the measurement data from the station. The program referenced the station's measurement points using the ID and token from the NETPIE system and further developed it into the Met4Agriculture Application, which is compatible with all platforms. It can display historical data for analysis of seasonal changes and set thresholds for each parameter that impacts agricultural crop performance during different seasons.

This research outcome enables the development of a low-cost prototype for an automatic in-field weather station monitoring system for agricultural field. The prototype system shows statistically significant measurement accuracy comparable to that of standard instruments. The developed stations were installed in all five regions in Thailand, this system can continuously collect, transmit, and display real-time monitoring data through a web application and real-time mobile applications, compatible with both iOS and Android operating systems.

Keywords: Automatic weather station system, Met4Agriculture program, IoT NETPIE system, sensor

บทนำ

กรมอุตุนิยมวิทยา ได้ติดตั้งสถานีตรวจอากาศผิวพื้นในเกือบทุกจังหวัด จำนวน 127 สถานี เพื่อตรวจวัดข้อมูลสารประกอบอุตุนิยมวิทยา โดยแต่ละสถานีมีระยะทางห่างไกลกันมาก ทำให้ค่าการตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาบางชนิดข้อมูลไม่ใช่ว่าข้อมูลที่เป็นตัวแทนของพื้นที่แต่ละแห่ง (WMO-No.8) ทำให้นักวิจัยด้านเทคโนโลยีการผลิตพืชและเกษตรกรรมแปลงใหญ่บางพื้นที่ไม่มีข้อมูลที่ต้องการเพื่อบริหารจัดการให้เหมาะสมกับพื้นที่และชนิดพืช โดยเฉพาะภาคการเกษตรจำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากข้อมูลพยากรณ์อากาศและข้อมูลการตรวจอากาศที่มีความถูกต้องแม่นยำ และมีข้อมูลการตรวจวัดสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ในพื้นที่เพาะปลูกของตนเอง ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการบริหารจัดการการผลิตผลให้เหมาะสมตามสภาพภูมิอากาศและเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น (Sonam Tenzin, 2017) แม้ว่าปัจจุบันจะมีชุดตรวจวัดอากาศจำหน่ายราคาตั้งแต่ราคาหลักร้อยจนถึงหลักหมื่นบาท แต่หากจะให้ข้อมูลตรวจวัดเป็นที่เชื่อถือจะต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดที่มีความถูกต้องและแม่นยำเหมาะสมกับการปฏิบัติงาน (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาต้นแบบชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามต้นทุ่นต่ำประกอบด้วยเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือ จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความชื้นในดินและความเข้มแสง รวมทั้งพัฒนาระบบสมาร์ตอุตุนิยมวิทยาเพื่อการเกษตร (Met4Agriculture) เพื่อแสดงผลข้อมูลการตรวจวัดออนไลน์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันและระบบสมาร์ตโฟนที่ใช้ไอโอเอส (iOS) และแอนดรอยด์ (Android) แบบเรียลไทม์ เพื่อให้นักวิจัยและเกษตรกรมีข้อมูลสำหรับการวางแผนการเพาะปลูกในแปลงเกษตรของตนเองเกิดการปรับเปลี่ยนรูปแบบเกษตรกรรมจากเดิมที่ผลผลิตไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศเป็นการทำเกษตรกรรมแบบนำเทคโนโลยีมาใช้เพื่อลดค่าใช้จ่าย ช่วยยกระดับผลผลิตให้มีคุณภาพสูง ก้าวสู่การเป็นเกษตรยุคสมัยใหม่ที่ทำได้มาก

แนวคิด ทฤษฎีและกรอบแนวคิด

การพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามมีแนวคิด ทฤษฎีและกรอบแนวคิดงานวิจัย ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อ การเกิดคลื่นความร้อน ภัยแล้ง รูปแบบของฝนในแต่ละฤดูกาล ฝนตกหนักและน้ำท่วม เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรอย่างมาก ดังนั้น หากสามารถพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติที่มีต้นทุนต่ำและมีผลการตรวจวัดที่ถูกต้องแม่นยำ สามารถแสดงผลการตรวจวัดผ่านทางเว็บไซต์หรือ Smart Device จะเป็นการผลิตนวัตกรรมต้นแบบที่ยกระดับเทคโนโลยีไทย ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ เกษตรกรสามารถติดตั้งได้ด้วยตนเอง ราคาไม่แพง ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องตามมาตรฐานของข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ทำให้มีผลผลิตเพิ่มขึ้น ลดการสูญเสียในระบบการผลิตแบบเดิม เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น คุณภาพชีวิตดีขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติเพื่อนำมาประยุกต์เป็นแนวคิดในการออกแบบงานวิจัย อาทิ ธีษณิน พจน์พัฒนาผล และคณะ (2558) ได้พัฒนาเครื่องวัดสภาพอากาศพื้นฐานอัตโนมัติที่ใช้เครื่องวัดปริมาณฝนแบบกึ่งทรงกระบอก หัววัดความกดอากาศและอุณหภูมิรุ่น BMP085 และหัววัดความชื้นสัมพัทธ์รุ่น DHT11 ใช้ในการเก็บค่าปริมาณฝน ความกดอากาศอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ATMEGA1280 งานวิจัยของ Nisakorn Kaewmai และคณะ (2565) ก็ได้พัฒนาชุดตรวจอากาศที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแบบ DHT22 เซนเซอร์ตรวจวัดค่าความชื้นในดิน และเซนเซอร์ตรวจวัดค่าระดับน้ำในแปลงนา เชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลขนาดเล็กไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU โดยอุปกรณ์เซนเซอร์ทั้งสามทำงานร่วมกันผ่านหน่วยประมวลผล NodeMCU บนโปรแกรม Arduino IDE และข้อมูลตรวจวัดจะถูกส่งไปแสดงผลยังระบบ Cloud สาธารณะของเว็บไซต์ ThingSpeak และแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk งานวิจัยของอุทัย และคณะ (2557) ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดินกับผลผลิตพืชปาล์มน้ำมัน และแสดงผลข้อมูลออนไลน์ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตและระบบสมาร์ตโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการ IOS และ Android แบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ พันกร มนทอง (2560) ทำการศึกษาพลังงานแสงอาทิตย์โดยการออกแบบวงจรและสร้างโปรแกรมควบคุมการวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ โดยใช้บอร์ด ESP - 8266 ในการอ่านค่าจากไพโรรามิเตอร์ผ่านตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้ว ส่งค่าข้อมูลไปยังบอร์ด Raspberry pi ที่ทำหน้าที่ในการส่งค่าข้อมูลไปที่ NETPIE จากนั้น NETPIE ส่งข้อมูลไปที่ Raspberry pi ตัวที่ทำหน้าที่เป็นผู้ใช้ (User) ที่ทำหน้าที่จัดเก็บเป็นฐานข้อมูลแบบตามเวลาจริง (Real time) พบว่าพลังงาน

แสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นและสูงสุดในช่วงเวลา 12.00 น. - 13.00 น. และจะลดลงหลังจากเวลาประมาณ 13.00 น. เป็นต้นไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1) การวัดค่าความชื้นในดิน (measuring soil water content) สมบูรณ์ และคณะ (2551) กล่าวว่า การวัดความชื้นของดิน สามารถทำการวัดได้ทั้งทางตรงและโดยอ้อม ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ใหญ่ ๆ คือ

- วิธีวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric method) โดยการเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาน้ำหนักดินเปียก จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 -110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักแห้งของดินคงที่ แล้วนำไปคำนวณโดยใช้สูตร

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s}$$

ในที่นี้ θ_m คือ ระดับความชื้นโดยมวล, m_w คือ มวลของน้ำในดิน และ m_s คือ มวลของดินแห้งสนิท หมายถึง ดินที่ผ่านการอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 - 110°C จนมีมวลคงที่หรือคำนวณเป็นร้อยละของความชื้นด้วยสูตรการคำนวณ คือ

$$\text{ความชื้นโดยน้ำหนัก (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักดินเปียก} - \text{น้ำหนักดินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักดินอบแห้ง}} \times 100$$

- การใช้แท่งวัดความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance block)
- การใช้เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer)
- เครื่องวัดความชื้นด้วยนิวตรอน (neutron moisture gauge)

2) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว อุณหภูมิเดียวกัน หรือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์จะแสดงในรูปของร้อยละ (%) มีหน่วยเป็น %RH (กรมอุตุนิยมวิทยา)

3) NETPIE (Network Platform for Internet of Everything) เป็นคลาวด์แพลตฟอร์มสำหรับให้บริการเชื่อมต่อ การสื่อสาร IoT ที่พัฒนาโดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมเป็นคลาวด์ในทุกองค์ประกอบ สามารถขยายตัวได้อย่างอัตโนมัติ ดูแลและซ่อมแซมตัวเองได้อัตโนมัติเมื่อส่วนหนึ่งส่วนใดในระบบมีปัญหา โดยไม่ต้องพึ่งผู้ดูแลระบบ การบริหารจัดการระบบเป็นแบบ Plug-and-Play ไม่ต้อง Configure หรือปรับแต่ง

ในส่วนของอุปกรณ์ NETPIE มี Client Library หรือที่เรียกว่า Microgear ทำหน้าที่สร้างและดูแลช่องทางสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับ NETPIE รวมไปถึงรักษาความปลอดภัยในการส่ง

ข้อมูล Microgear เป็น Open Source และสามารถดาวน์โหลดได้จาก <https://github.com/netpieio> (<https://netpie.io/tutorials>)

กรอบแนวคิดงานวิจัย

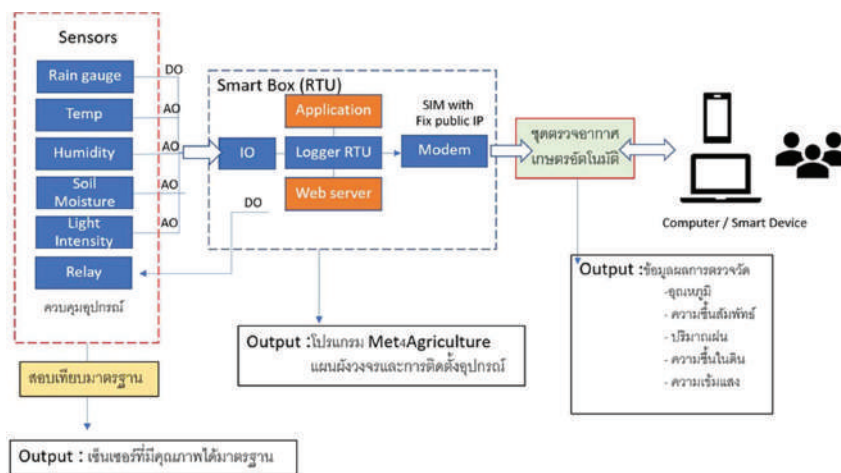


Figure 1 Conceptual Framework

กรอบแนวคิดงานวิจัย (Figure 1) จะพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามต้นทุนต่ำชุดเล็กสำหรับติดตั้งในแปลงเกษตร ประกอบด้วยเซนเซอร์ 5 ชนิด สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความชื้นในดินที่ระดับความลึกจากผิวดิน 10 เซนติเมตรและความเข้มแสง โดยเซนเซอร์ 5 ชนิดนี้ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือจากกรมอุตุนิยมวิทยาและมหาวิทยาลัยศิลปากร รวมทั้งออกแบบตู้ควบคุมชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนาม ระบบการทำงานของอุปกรณ์ภายในใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และพัฒนาระบบสมาร์ทอตุณิยมวิทยาเพื่อการเกษตร (Met4Agriculture) ที่มีหลักการทำงานเริ่มจากเซนเซอร์ตรวจวัดต่างๆ ส่งข้อมูลผ่านสายสัญญาณ โดยถึงฝนจะส่งข้อมูลแบบดิจิทัลเอาต์พุต (Digital output (DO)) มีค่า 0/1 ซึ่งจะมีค่า 1 เมื่อมีการกระดก (tip) ของตัวตรวจวัดค่าที่ได้จะรับด้วยดิจิทัลอินพุต (Digital Input (DI)) ของตัว IO (Input/Output module) ส่วนเครื่องมือตรวจวัดอื่นๆ จะส่งข้อมูลการตรวจวัดเป็นข้อมูลออกแบบแอนะล็อก (Analog Output (AO)) ที่อาจจะมียุทธยานค่าโวลต์ V หรือแอมป์ A ขึ้นกับชนิดอุปกรณ์ตรวจวัด ค่าที่ได้จะรับด้วยแอนะล็อกอินพุต (Analog Input) ของตัว IO (Input/Output module) และมีโปรแกรมประมวลผลการทำงานบนระบบควบคุมและหน่วยทำงานระยะไกล (Remote terminal unit (RTU)) โดยการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- โปรแกรม Web service ที่ให้บริการข้อมูลไปยังโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile application) เพื่อนำข้อมูลไปแสดงผล

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติและการพัฒนาระบบสมาร์ทอตุณิยมวิทยา มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานแต่ละส่วนแสดงใน Figure 2 ดังนี้

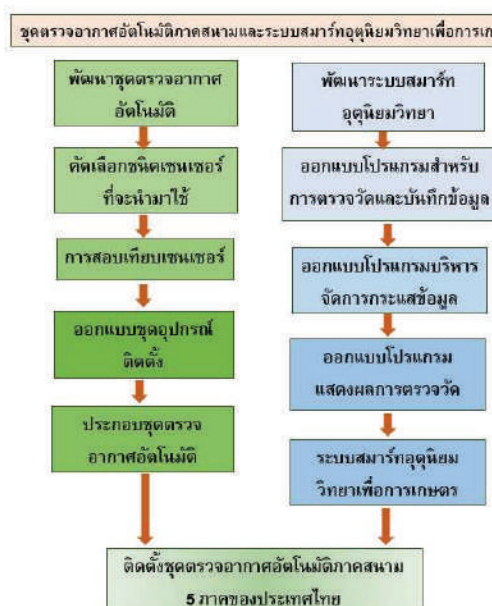


Figure 2 Research flow chart

- โปรแกรม Logger ที่รับส่งข้อมูลจาก IO Module เพื่อนำมาบันทึกลงฐานข้อมูล และสั่งงาน IO เพื่อควบคุมการทำงานอุปกรณ์รีเลย์ (Relay) ภายนอก เพื่อปิด-เปิดการทำงานของอุปกรณ์บางอย่าง เช่น มอเตอร์รดน้ำ เป็นต้น

1. พัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติ

1.1 คัดเลือกเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความชื้นในดินและความเข้มแสงอย่างละ 2 - 3 ชนิด โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเฉพาะ ราคา

- เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ จำนวน 3 ชนิด คือ AM2315 รุ่น ASAIR, เซนเซอร์แบบกันน้ำ SHT31 และ RS485- AHT15

- เครื่องวัดปริมาณฝนแบบถ้วยกระดก เส้นผ่าศูนย์กลางของปากถังกว้าง 8 นิ้ว จำนวน 2 ชนิด คือ OEM ความละเอียด 0.2 มิลลิเมตร/ความจุของการเทกระดก 1 ครั้ง (0.2 mm/tip) และ ABS-RS485 ความละเอียด 0.5 มิลลิเมตร /ความจุของการเทกระดก 1 ครั้ง (0.5 mm/tip)

- เซนเซอร์วัดความเข้มแสง จำนวน 3 ชนิด คือ ช่วงการวัดแสงโดยรอบ 0-120000 lux, 0-200000 lux และ 0-65535 lux

- เซนเซอร์วัดความชื้นดิน จำนวน 3 ชนิด ที่ส่งสัญญาณออกแบบคือ RS485 TDR Soil Moisture Sensor และ ชนิดส่งสัญญาณออกแบบแอนะล็อก คือ Lon Soil Moisture Sensor และ Soil humidity sensor

1.2 สอบเทียบเซนเซอร์ที่คัดเลือกไว้ในข้อ 1 เพื่อเลือกเซนเซอร์ที่มีคลาดเคลื่อนในการสอบเทียบน้อยที่สุด มาใช้ประกอบชุดตรวจอากาศอัตโนมัติ กำหนดความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝนไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส, 3 %RH และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการสอบเทียบและผลการทดสอบ แต่ละเซนเซอร์ ดังนี้

1.2.1 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ณ ห้องสอบเทียบส่วนมาตรฐานเครื่องมือกรมอุตุนิยมวิทยา

- เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สอบเทียบ คือ เครื่องควบคุมและกำเนิดอุณหภูมิและความชื้นแบบตู้ CVMS CLIMATIC รุ่น C-THL150-40/1-SP และเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของ Michell hygrometer รุ่น Optidew 401 S/N 161430 เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้รับใบรับรองมาตรฐานการสอบเทียบจากสถาบันมาตรฐานมาตรวิทยา

ติดตั้งเครื่องมือสอบเทียบโดยให้หัววัดความชื้นมาตรฐานและ Electronic Thermo-Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบอยู่ใกล้กันมากที่สุด เพื่อให้หัววัดทั้งสองตัวอยู่ภายใต้สภาวะเดียวกันภายในตู้สอบเทียบ จากนั้นต่อสายสัญญาณจากเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล

- เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นและตั้งค่าของตู้สอบเทียบไว้ที่อุณหภูมิและความชื้นที่ต้องการสอบเทียบเป็นจุดแรกและทิ้งระยะเวลาให้อุณหภูมิและความชื้นในตู้สอบเทียบอยู่ในสภาวะเสถียรไม่น้อยกว่า 30 นาที โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิและความชื้นจากหัววัดมาตรฐานให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือตามข้อกำหนดของผู้ผลิตเครื่องมือ

- บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละค่าสอบเทียบที่อ่านได้จากหัววัดมาตรฐาน ไม่น้อยกว่า 5 ครั้ง โดยทิ้งช่วงเวลาในการบันทึกผลแต่ละครั้งไม่น้อยกว่า 1 นาที บันทึกผลของเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบกับค่ามาตรฐาน

- กำหนดจุดสอบเทียบอุณหภูมิ 3 จุดสอบเทียบ คือ 5, 25, 50 °C และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30, 60, 90 %

ตัวอย่างชุดข้อมูลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่คัดเลือก (AM2315C รุ่น ASAIR, SHT31 และ RS485- AHT15) กับเซนเซอร์มาตรฐาน (Michell hygrometer) แสดงใน Table 1

Table 1 Calibration results of temperature and relative humidity sensors and Michell hygrometer

MICHELL		AM2315		correction		SHT31		correction		AHT15		correction	
T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
9.40	90.40	9.50	90.61	-0.10	-0.21	9.85	88.30	-0.45	2.10	9.50	90.00	-0.10	0.40
9.40	90.40	9.52	90.51	-0.12	-0.11	9.88	88.74	-0.48	1.66	9.53	90.10	-0.13	0.30
9.40	90.50	9.53	90.59	-0.13	-0.09	9.80	89.00	-0.40	1.50	9.53	90.95	-0.13	-0.45
9.40	90.40	9.60	90.48	-0.20	-0.08	9.80	89.20	-0.40	1.20	9.58	90.00	-0.18	0.40
9.40	90.30	9.59	90.40	-0.19	-0.10	9.78	88.80	-0.38	1.50	9.51	90.00	-0.11	0.30

Table 1 Calibration results of temperature and relative humidity sensors and Michell hygrometer (cont.)

MICHELL		AM2315		correction		SHT31		correction		AHT15		correction	
T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H	T	H
9.30	79.50	9.49	78.60	-0.19	0.90	9.65	78.00	-0.35	1.50	9.55	79.62	-0.25	-0.12
9.30	79.50	9.52	78.68	-0.22	0.82	9.65	77.80	-0.35	1.70	9.52	79.62	-0.22	-0.12
9.30	79.30	9.53	78.40	-0.23	0.90	9.73	77.60	-0.43	1.70	9.40	79.41	-0.10	-0.11
9.30	79.40	9.48	78.49	-0.18	0.91	9.66	77.65	-0.36	1.75	9.44	79.41	-0.14	-0.01
9.30	79.50	9.49	78.60	-0.19	0.90	9.66	78.00	-0.36	1.50	9.46	79.55	-0.16	-0.05
19.00	58.50	19.18	58.24	-0.18	0.26	19.21	56.30	-0.21	2.20	19.21	58.92	-0.21	-0.42
19.00	58.50	19.19	58.59	-0.19	-0.09	19.50	56.10	-0.50	2.40	19.20	58.55	-0.20	-0.65
19.10	58.40	19.20	58.00	-0.10	0.40	19.40	56.00	-0.30	2.40	19.23	59.05	-0.13	-0.65
19.00	58.50	19.18	58.72	-0.18	-0.22	19.33	56.00	-0.33	2.50	19.20	58.50	-0.20	0.00
19.10	58.40	19.21	57.95	-0.11	0.45	19.52	56.30	-0.42	2.10	19.20	58.90	-0.10	-0.50
29.10	47.50	29.17	47.88	-0.07	-0.38	29.50	45.57	-0.40	1.93	29.30	48.85	-0.20	-1.35
29.10	47.50	29.17	47.69	-0.07	-0.19	29.50	45.30	-0.40	2.20	29.30	48.82	-0.20	-1.32
29.10	47.60	29.19	47.74	-0.09	-0.14	29.60	45.68	-0.50	1.92	29.20	48.68	-0.10	-1.08
29.20	47.60	29.30	47.77	-0.10	-0.17	29.70	45.56	-0.50	2.04	29.30	48.68	-0.10	-1.08
29.10	47.30	29.18	47.65	-0.08	-0.35	29.60	45.33	-0.50	1.97	29.28	48.62	-0.18	-1.32
39.10	37.20	39.15	38.53	-0.05	-1.33	39.44	35.50	-0.34	1.70	39.27	40.05	-0.17	-2.85
39.20	36.70	39.20	38.28	0.00	-1.58	39.69	34.90	-0.49	1.80	39.40	40.02	-0.20	-3.32
39.20	37.70	39.22	38.95	-0.02	-2.25	39.58	35.10	-0.38	1.60	39.40	39.90	-0.20	-3.20
39.20	37.70	39.33	38.19	-0.13	-1.49	39.70	35.00	-0.50	1.70	39.38	39.90	-0.18	-3.20
39.20	36.50	39.25	38.01	-0.05	-1.51	39.69	35.00	-0.49	1.50	39.40	39.60	-0.20	-3.10
49.10	17.30	49.21	18.61	-0.11	-1.31	49.55	17.52	-0.45	-0.22	49.23	21.52	-0.13	-4.22
49.10	17.40	49.22	18.59	-0.12	-1.19	49.53	17.65	-0.43	-0.25	49.20	21.53	-0.10	-4.13
49.10	17.20	49.23	18.36	-0.13	-1.16	49.55	17.44	-0.45	-0.24	49.24	21.66	-0.14	-4.46
49.10	17.20	49.24	18.38	-0.14	-1.18	49.52	17.40	-0.42	-0.20	49.26	21.48	-0.16	-4.28
49.10	17.30	49.22	18.30	-0.12	-1.00	49.52	17.35	-0.42	-0.05	49.26	21.36	-0.16	-4.06



Figure 3 Tripping budget rain gauge (0.2 mm/tip) and calibration kit

จากผลการสอบเทียบใน Table 1 พบว่าเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ AM2315 รุ่น ASAIR มีความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดเมื่อเทียบกับเซนเซอร์มาตรฐาน (Michell hygrometer) น้อยที่สุด คือ ประมาณ 1 องศาเซลเซียส และ 1-3 %RH ตามลำดับ

1.2.2 สอบเทียบเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ณ ห้องสอบเทียบส่วนมาตรฐานเครื่องมือ กรมอุตุนิยมวิทยา ตามหลัก การสอบเทียบเครื่องมือวัดที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ด้วยชุดสอบเทียบปริมาณน้ำฝน Rain Gauge Calibrator รุ่น 260-2595 ของบริษัท NovaLynx และติดตั้งกับเครื่องวัดปริมาณฝนแบบถ้วยกระดก (Tripping budget rain gauge) ที่ใช้ทดสอบชนิด 0.2 mm/tip และ 0.5 mm/tip ดัง Figure 3 จากนั้นบรรจุน้ำตามปริมาตรที่กำหนดไว้ คือ 250 ml, 500 ml, 946 ml และบันทึกค่าที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณ ฝนแบบถ้วยกระดกทั้งสองชนิด ตัวอย่างชุดผลการสอบเทียบ เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนกับชุดสอบเทียบมาตรฐาน แสดงใน Table 2

Table 2 Result of rain gauge calibration

volume of water (ml)	Counter θ 8 inches	Counter Test1	correction	Counter θ 8 inches	Counter Test2	correction
250	38.5	39	-0.5	15.4	14	1.4
	38.5	38	0.5	15.4	13	2.4
	38.5	38	0.5	15.4	14	1.4
500	77.0	76	1	30.8	29	1.8
	77.0	77	0	30.8	29	1.8
	77.0	77	0	30.8	30	0.8
946	145.8	146	-0.2	58.3	56	2.3
	145.8	145	0.8	58.3	55	3.3
	145.8	146	-0.2	58.3	58	0.3

หมายเหตุ test 1 และ test 2 คือ เครื่องวัดปริมาณฝนแบบถ้วยกระดกที่ใช้ทดสอบชนิด 0.2 mm/tip และ 0.5 mm/tip ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรทรงกระบอก} = \pi r^2 h \quad (1)$$

โดยที่

r คือ รัศมีปากถังวัดน้ำฝน (1 นิ้ว = 25.4 มิลลิเมตร)

1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm³) = 0.001 มิลลิลิตร

(ml)

ผลการสอบเทียบพบว่า เครื่องวัดปริมาณฝนแบบถ้วยกระดกชนิด 0.2 mm/tip มีความคลาดเคลื่อนในการสอบเทียบกับเครื่องวัดน้ำฝนมาตรฐาน ± 3 มิลลิเมตร

1.2.3 สอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน

งานวิจัยนี้ทำการสอบเทียบค่าความชื้นในดินด้วยวิธีวัดโดยน้ำหนัก (Gravimetric method) ตามหลักการคำนวณหาความชื้นในดินของงานวิจัยสมบูรณ์ และคณะ (2551) มีขั้นตอนดังนี้

- นำตัวอย่างดินใส่ในภาชนะจำนวน 5 ใบ โดยเติมน้ำ 0, 25, 50, 75 และ 100 กรัม

- วัดความชื้นในดินในภาชนะทั้ง 5 ใบ ด้วยเซนเซอร์ชนิดที่ 1-3 คือ TDR Soil Moisture Sensor, Lon Soil Moisture Sensor และ Soil humidity sensor ตามลำดับ แล้วบันทึกค่าไว้

- ชั่งน้ำหนักดินในภาชนะทั้ง 5 ใบ ก่อนนำไปอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสอบครั้งละ 1 ชั่วโมง จนค่าน้ำหนักดินไม่เปลี่ยนแปลง

- นำค่าน้ำหนักดินก่อนอบ และหลังอบมาคำนวณหาค่าความชื้นในดินโดยใช้สูตรในสมการ (2)

$$\text{ความชื้นโดยน้ำหนัก (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักดินเปียก} - \text{น้ำหนักดินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักดินอบแห้ง}} \times 100 \quad (2)$$

- หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในดินที่คำนวณได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือเซนเซอร์วัดความชื้นในดินโดยวิธีการสหสัมพันธ์อย่างง่าย (simple correlation)

- หาค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของความชื้นในดินที่ได้จากเซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิด กับค่าความชื้นที่ได้จากการคำนวณจากน้ำหนัก (ค่าความชื้นจริง) จากสูตรในสมการที่ (3)

$$\text{ความคลาดเคลื่อน (\%)} = \left| \frac{\text{ค่าความชื้นจากน้ำหนัก} - \text{ค่าความชื้นจากเซนเซอร์}}{\text{ค่าความชื้นจากน้ำหนัก}} \right| \times 100 \quad (3)$$

ผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นในดินที่มีผลการทดสอบดีที่สุด คือ ชนิด TDR Soil Moisture Sensor พบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิดนี้มีค่าความชื้นที่วัดได้กับปริมาณความชื้นในดินที่คำนวณได้ตามสมการที่ 1 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองเข้าใกล้ 1 ดังตัวอย่างผลการสอบเทียบใน Table 3

Table 3 TDR Soil Moisture Sensor calibration results

น้ำหนักดิน (g)	น้ำหนักน้ำ (g)	น้ำหนักดินเปียก (g)	น้ำหนักดินแห้ง (g)	ความชื้นจากน้ำหนัก (%)	ค่าความชื้นจากเซนเซอร์ (%)									
					A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
580.0	0	580.0	543.7	7	8	88	10	6	9	7	8	10	12	9
580.0	50	630.0	542.3	16	20	27	25	24	25	17	19	20	21	19
580.0	100	680.0	542.5	25	31	35	35	29	36	32	25	26	28	27
580.0	150	730.0	730.0	34	38	42	53	39	47	44	37	36	42	33
580.0	200	780.0	780.0	44	53	48	61	46	54	58	53	47	53	44
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์					1.00	0.97	0.99	0.98	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00

หมายเหตุ: A1-A10 คือ เซนเซอร์ชนิด TDR Soil Moisture Sensor จำนวน 10 เซนเซอร์

1.2.4 สอบเทียบเซนเซอร์วัดความเข้มแสง

สอบเทียบหัววัดความเข้มแสงแบบพกพา Digital Lux Meter ของบริษัท PEAKMETER รุ่น PM 6612 กับหัววัดมาตรฐาน Lux meter ของบริษัท EKO รุ่น ML-020SO S/N S14057.15 มีค่า sensitivity เท่ากับ 0.2055 μV/lx ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบ และติดตั้งหัววัดความเข้มแสงแบบพกพาที่ต้องการสอบเทียบใกล้กับหัววัดมาตรฐาน และอ่านค่าข้อมูลของทั้งสองหัววัด โดยสอบเทียบเป็นเวลา 2 วัน ระหว่างวันที่ 11-12 มิถุนายน 2565 ตั้งแต่เวลา 9.00 น. - 16.00 น. ณ ดาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ดัง Figure 4 ทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องวัด

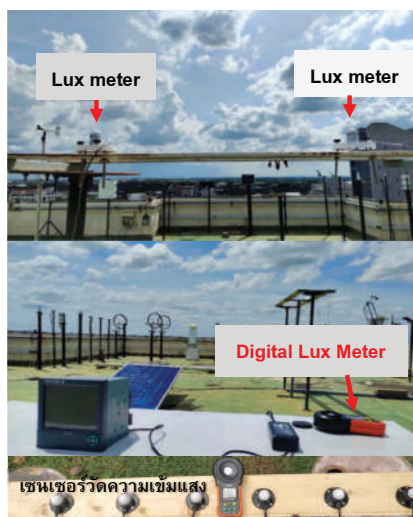


Figure 4 The calibration of a digital lux meter at Silpakorn University

มาตรฐานและค่าความสว่างจากเครื่องวัดที่นำมาทดสอบทุก ๆ 10 นาที ในแต่ละครั้งจะอ่านค่าทุก 10 วินาที จำนวน 13 ครั้ง จากนั้นพักเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วดำเนินการแบบเดิม นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดความสว่างมาตรฐานในหน่วย mV มาแปลงเป็นค่าความสว่างในหน่วย lux แล้วมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างจากเครื่องวัดความสว่างมาตรฐานและค่าความสว่างที่ได้จากเครื่องวัดความสว่างที่นำมาทดสอบ ผลที่ได้แสดงดัง Figure 5

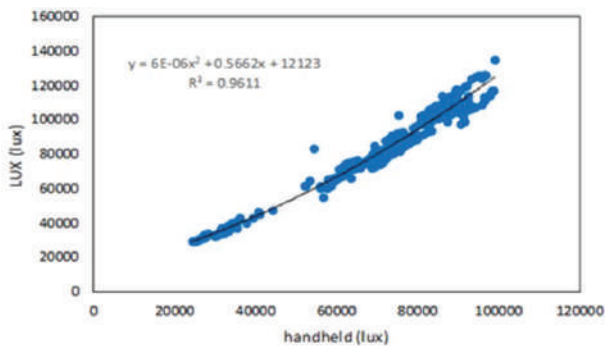


Figure 5 A graph showing the relationship of lux between Digital lux meter and Lux meter

จาก Figure 5 พบว่า ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง ดังนี้

$$L_{real} = 6 \times 10^{-6} L^2 + 0.566L + 12123 \quad (3)$$

$(R^2 = 0.96)$

นำค่าความสว่างจากห้ววัดมาตรฐานหารด้วยค่าความสว่างจากห้ววัดที่นำมาสอบเทียบแล้วหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงจะได้ผลแสดงใน Figure 6

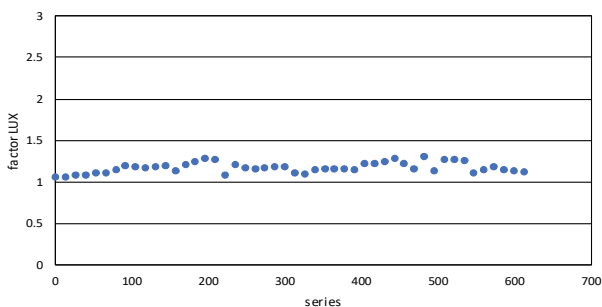


Figure 6 The graph shows average light intensity in each range

จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดจะได้แฟคเตอร์ (factor) ปรับค่าที่อ่านได้จากห้ววัดที่นำมาสอบเทียบ ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1.17 หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

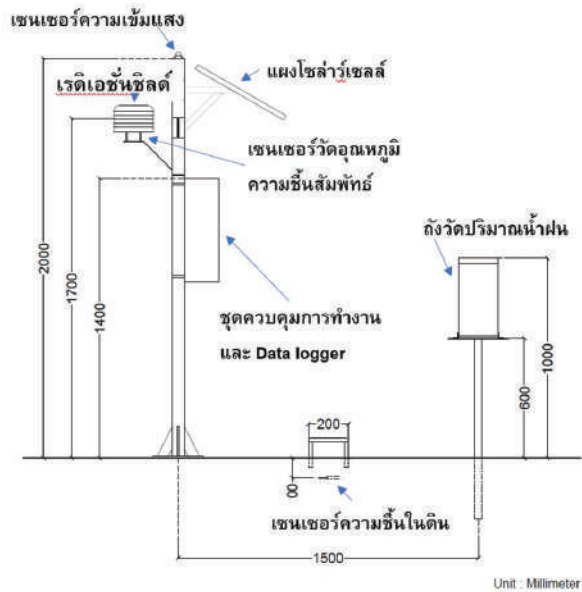


Figure 7 (a) structural drawing for installation of the Automatic in-field weather station

$$L_{real} = 1.17L \quad (4)$$

เมื่อ

L_{real} คือ ความสว่างที่แท้จริง (lux)

L คือ ความสว่างที่อ่านได้จากเครื่องที่นำมาสอบเทียบ (lux)

1.3 การออกแบบชุดอุปกรณ์ติดตั้ง

1.3.1 ออกแบบตู้/ชั้นวางสำหรับอุปกรณ์ตรวจอากาศและระบบการทำงานของอุปกรณ์ภายในโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.3.2 ออกแบบชุดอุปกรณ์การติดตั้งชุดตรวจอากาศอัตโนมัติดินแบบ ดังแสดงรูปที่ 7(a) โดยชุดตรวจอากาศอัตโนมัติดินแบบที่ประกอบสำเร็จแล้วแสดงในรูปที่ 7(b) ชุดอุปกรณ์การติดตั้งประกอบด้วย

1) เสาติดตั้งเซนเซอร์วัดปริมาณฝน ความสูง 60 เซนติเมตร

2) เสาความสูง 200 เซนติเมตร มีระยะห่างจากเสาติดตั้งเซนเซอร์วัดปริมาณฝน 150 เซนติเมตร โดยเสามีความสูง 200 เซนติเมตร ออกแบบสำหรับติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ อุปกรณ์ตรวจวัด บันทึกและส่งข้อมูล และเซนเซอร์ 4

ชนิด โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ติดตั้งภายในเรดิเอชันชิลด์ ที่ความสูง 170 เซนติเมตร และเซนเซอร์วัดความเข้มแสงจะติดตั้งที่ยอดเสา ส่วนเซนเซอร์วัดความชื้นในดินความลึกจากผิวดิน 10 เซนติเมตร

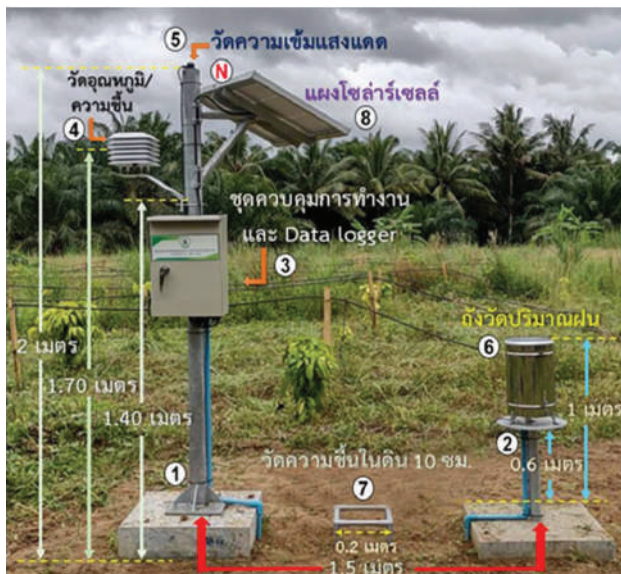


Figure 7 (a) structural drawing for installation of the Automatic in-field weather station

1.3.3 ออกแบบเรดิเอชันชิลด์ (Radiation shield)

สำหรับป้องกันรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบกับเซนเซอร์ทั้งสอง และให้เป็นการวัดค่าจากสิ่งแวดล้อมจริง โดยนำจานพลาสติกขึ้นรูปมาเจาะรูตรงกลางแล้วประกอบเป็นแผ่นซ้อนกัน 6 ชั้น ดัง Figure 8



Figure 8 Radiation shield

1.3.4 แบบแผงวงจรชุดควบคุมการทำงาน

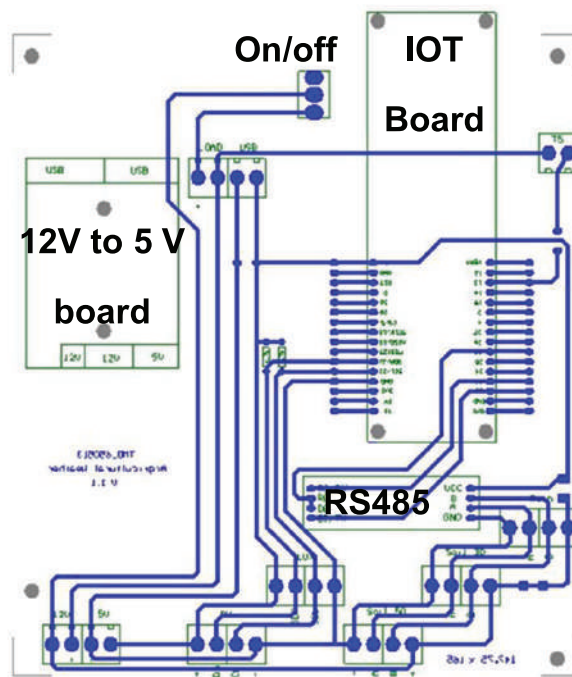


Figure 9 Operation control circuit board

จาก Figure 9 เป็นแบบแผงวงจรชุดควบคุมการทำงาน ที่ออกแบบไว้ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมระบบตรวจวัด บันทึก และรับ-ส่งข้อมูลของตรวจอากาศอัตโนมัติ

2. การพัฒนาระบบสมาร์ทอตุณนิยมวิทยา

แนวคิดการพัฒนาระบบสมาร์ทอตุณนิยมวิทยาแสดงใน Figure 10 มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

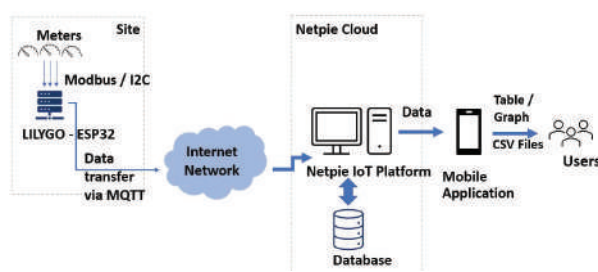


Figure 10 System overview

2.1 การออกแบบโปรแกรมสำหรับการตรวจวัด บันทึก และการรับ-ส่งข้อมูล

ออกแบบโปรแกรมทำงานบนลิลีโก (LILYGO) โปรแกรมจะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ อุปกรณ์สื่อสารและไฟฟ้า และ sdcard เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมมีชุดคำสั่งให้เซนเซอร์แต่ละชนิดทำการตรวจวัดและบันทึกค่าลงใน sdcard และส่งค่าข้อมูลจากการตรวจวัดเข้าสู่ระบบคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ (Cloud server)

ในทุกๆ 15 นาที นอกจากนี้เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานชุดตรวจอากาศอัตโนมัตินี้ จึงออกแบบให้โปรแกรมสามารถรองรับการทำงานในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่มี sdcard สำหรับการบันทึกค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยข้อมูลตรวจวัดจะถูกส่งเข้าระบบคลาวด์เซิร์ฟเวอร์เพื่อเก็บบันทึกค่าโดยตรงได้

2.2 โปรแกรมบริหารจัดการการกระจายข้อมูลตรวจวัดหรือการรับ-ส่งข้อมูล ทำหน้าที่ควบคุมการส่งข้อมูลจากสถานี

วัดภาคสนามมายังหน่วยจัดเก็บและบันทึกข้อมูลตรวจวัด โดยใช้บริการระบบจัดการการกระจายข้อมูลและบันทึกข้อมูล (Data storage) ในรูปแบบ Cloud

2.3 ออกแบบโปรแกรมแสดงผลการตรวจวัดและระบบสมาร์ทอคูนิยมวิทยาเกษตรให้ทำงานบนระบบแอนดรอยด์ ต่อยอดให้ทำงานบนระบบ iOS วินโดวส์และลินุกซ์ ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรมดัง Figure 11

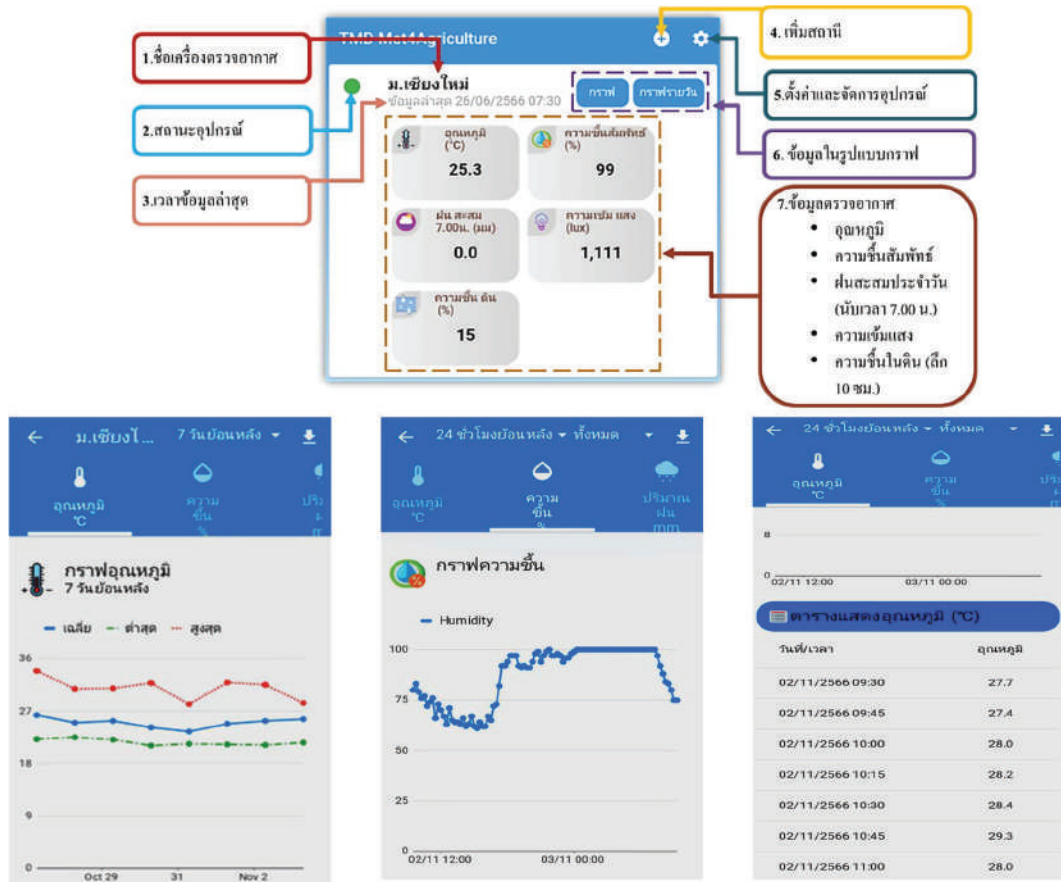


Figure 11 Met4Agriculture application display output data from automatic in-field weather stations

โปรแกรม Met4Agriculture จะมีเมนูหน้าหลักแสดงผลข้อมูลการตรวจวัดจากเซนเซอร์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณฝน ความเข้มแสง ความชื้นในดินและปุ๋ยเมนูการเพิ่ม-ลบ สถานี การตั้งค่าโปรแกรม และดูข้อมูลย้อนหลัง โปรแกรมจะแสดงผลการตรวจวัดจากภาคสนามผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ทุก 15 นาที โดยเชื่อมต่อระบบ NETPIE นำข้อมูลสถานะและข้อมูลตรวจวัดล่าสุดมาแสดง แสดงค่าข้อมูลตรวจวัดปัจจุบันทุกจุดตรวจวัดในรูปแบบ Dashboard เมื่อกดจุดตรวจวัดจะแสดงข้อมูลแบบละเอียดและแสดงสถานะและสถานะสถานี จัดการและวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดแบบเวลาจริงหรือใกล้เคียงเวลาจริงได้อย่างอัตโนมัติ เช่น สถานะ

ข้อมูลของแต่ละสถานี (ปกติ/ไม่ปกติ) มีปุ่มสำหรับกดส่งออกข้อมูลที่แสดงเป็นไฟล์ csv รวมทั้งโปรแกรมมีรอบการเรียกข้อมูลมาแสดงผล สามารถแสดงข้อมูลย้อนหลังในรูปแบบกราฟรายชั่วโมง รายวัน รายเดือน ระยะเวลาในการจัดเก็บและเรียกดูข้อมูล 180 วัน และมี notification bar เตือน ถ้าผู้ใช้งานตั้งค่าเกณฑ์แจ้งเตือน การใช้งานโปรแกรม Met4Agriculture สามารถใช้งานผ่าน Web Browser โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมได้ทุก Platform ไม่ว่าจะเป็น คอมพิวเตอร์ Windows, Mac, Linux, โทรศัพท์มือถือ Android, IOSโดยผู้ใช้งานสแกน QR code ใน Figure 12 เพื่อดาวน์โหลดโปรแกรม Met4Agriculture



Figure 12 Met4Agriculture application QR code

3. การติดตั้งชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนาม
ติดตั้งชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามในพื้นที่

1) กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา กรุงเทพฯ

2) แปลงทดลองพืชสวน ภาควิชาพืชศาสตร์และ
รัฐศาสตร์คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
จังหวัดเชียงใหม่

3) แปลงทดลองปลูกพืชหมุนเวียนระยะสั้น (พืชไร่
พืชสวน) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยี
การเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

4) ศูนย์เรียนรู้การผลิตพืชตามแนวพระราชดำริทฤษฎี
ใหม่จันทบุรี ตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรจันทบุรี
กรมวิชาการเกษตร จังหวัดจันทบุรี

5) สวนผสมปาล์มน้ำมันและโกโก้ของเกษตรกรที่บ้าน
ควนสูง ตำบลคันธุลี อำเภอท่าชนะ จังหวัดสุราษฎร์ธานี

6) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนมะม่วงบ้านแฮดเพื่อการ
ส่งออก ตำบลหนองแซง อำเภอบ้านแฮด จังหวัดขอนแก่น

7) กลุ่มเกษตรกรบ้านตะโหมด ตำบลตะโหมด อำเภอ
ตะโหมด จังหวัดพัทลุง

8) กองจัดการสวนยาง 3 การยางแห่งประเทศไทย
การยางแห่งประเทศไทย ตำบลกรูงหยัน อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัด
นครศรีธรรมราช

9) ศูนย์วิจัยยางสุราษฎร์ธานี การยางแห่งประเทศไทย
ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามมีต้นทุน
การผลิตต่ำประกอบด้วยเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบจำนวน
5 ชนิด สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณ
ฝน ความเข้มแสง ความชื้นในดิน และส่งข้อมูลไปแสดงผล
บนโปรแกรม Met4Agriculture จากการสอบเทียบเซนเซอร์
ชนิดต่างๆ ที่นำมาประกอบชุดตรวจอากาศอัตโนมัติ

พบว่า เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
ASAIR-AM2315 มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 องศาเซลเซียส
และ 1-3 %RHตามลำดับ ถึงวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกวัด
ปริมาณน้ำฝนได้ตั้งแต่ 0.2 มิลลิเมตรขึ้นไป มีความคลาดเคลื่อน
± 3 มิลลิเมตร เซนเซอร์วัดความชื้นในดินชนิด TDR Soil
Moisture Sensor มีค่าความชื้นที่วัดได้กับปริมาณความชื้นใน
ดินที่คำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าสัมประสิทธิ์
สหสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองเข้าใกล้ 1 และเซนเซอร์วัดความ
เข้มแสงช่วงการวัดแสงโดยรอบ 0-120000 lux ใช้แฟลคเตอร์
ปรับค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากเครื่อง คือ 1.17 และเมื่อ
ติดตั้งชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามจำนวน 9 แห่ง
ใน 5 ภาคของประเทศ พบว่ามีการตรวจวัด รับ-ส่งข้อมูล
อย่างต่อเนื่อง ระบบสมาร์ทอูตุนิยมวิทยาเพื่อการเกษตร
(Met4Agriculture Application) สามารถแสดงผลการตรวจวัด
จากภาคสนามผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ทุก 15 นาที
และเกษตรกรบ้านควนสูงได้ต่อยอดงานวิจัยด้วยการติดตั้ง
ระบบรดน้ำอัตโนมัติโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากชุดตรวจอากาศ
อัตโนมัติที่แสดงผลในมือถือด้วยโปรแกรม Met4Agriculture
โดยตั้งค่าสำหรับแจ้งเตือนการควบคุมการรดน้ำด้วยระบบ
รดน้ำอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องอยู่ในพื้นที่สวนผสมปาล์ม
น้ำมันและโกโก้ของตนเอง

ข้อเสนอแนะ

การเลือกสถานที่ติดตั้งเครื่องมือชุดตรวจอากาศ
อัตโนมัติภาคสนามควรเป็นที่โล่งตามหลักการติดตั้งเครื่องมือ
ตรวจอากาศของอุตุนิยมวิทยาโลก (WMO-No.8) ทิศทาง
ติดตั้งแผงโซลาร์ต้องสามารถรับแสงอาทิตย์ได้โดยเฉพาะช่วง
12.00 น. - 13.00 น. ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นและ
สูงสุดในช่วงเวลานี้จากงานวิจัยของพันกร มนทอง (2560)
และพื้นที่ติดตั้งต้องมีสัญญาณอินเทอร์เน็ตในการรับ-ส่ง
ข้อมูล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และ
นวัตกรรม ที่สนับสนุนงบประมาณดำเนินงานโครงการวิจัย
เรื่อง “ชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามและระบบสมาร์ท
อูตุนิยมวิทยาเพื่อการเกษตร” และขอบคุณ ดร.ชมภารี ชมภูรัตน์
อธิบดีกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย ขอขอบคุณ
การยางแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี กรมวิชาการเกษตร เกษตรกรบ้านควนสูง
กลุ่มวิสาหกิจชุมชนมะม่วงบ้านแฮด และกลุ่มเกษตรกรบ้าน
ตะโหมด ที่อนุเคราะห์พื้นที่ในการติดตั้งชุดตรวจอากาศ
อัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

ธิษณิน พจน์พัฒนาพล, ศุภกร กตาทิการกุล, มารีนามะหณี. (2558). การพัฒนาเครื่องวัดสภาพอากาศพื้นฐานแบบ อัตโนมิติ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 18(3).

พันกร มนทอง. (2560). การสร้างเครื่องมือวัดพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเก็บข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ในจังหวัดอุบลราชธานีและจังหวัดศรีสะเกษ. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

ภาสกร เดชโค่น. (2558). การพัฒนาระบบสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานสากล. ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สมบูรณ์ มั่นความดี ผจงจิตต์ ศรีสุข และสุภัทตรา นุชนารถ. (2551). การพัฒนาเครื่องวัดความชื้นในดินทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อจัดการดินและน้ำชลประทานในดินทรายอย่างมีประสิทธิภาพ. กรมชลประทาน.

อุทัยและคณะ. (2557). เน็ตเวิร์คเซนเซอร์แบบเรียลไทม์เพื่อตรวจสอบความชื้นพีชปาล์มน้ำมันกับผลผลิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Rajinder Kumar M. Math, Nagaraj V. Dharwadkar. (2018). IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India. 2nd International Conference on I-SMAC, DOI: 10.1109/I-SMAC43168.

Nisakorn Kaewmai และ Anurak Udomvech. (2565). The Mini Weather System for Using in a Specific Small Agricultural Area, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 29 ประจำปี 2565 วิจัยและนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

WMO-No.8Seventh edition. (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.

ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. (<https://www.iasonline.org/wp-content/uploads/2021/02/ISO-IEC-17025-2017-IAS.pdf>).

Rain Gauge Calibrator (<https://novalynx.com/manuals/260-2595-manual.pdf>).

<https://cmitest.com/wp-content/uploads/2021/03/CMI-Michell-Instruments-Optidew-401-501-97552-V3-EN.pdf>.

<https://netpie.io/tutorials>.

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

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 300 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาที่ผ่านมา

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 หรือตั้งประเด็นคำถามการวิจัย 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 **300 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

Mahasarakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-district, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4375 4416 ext. 1754

Advisors

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

Editor-in-Chief

Professor Dr. Preecha Prathepha

Assistant Editors

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

Editorial Board

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

Professor Dr. Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr. Sunan Saikrasun
Mahasarakham University
Associate Professor Dr. Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Chantana Aromdee
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr. Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Chawalit Boonpok
Mahasarakham University
Associate Professor Terdak Khammeng
Nakhon Phanom University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr. Natapol Pumipuntu
Mahasarakham 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
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr. Alongkorn Lamom
Mahasarakham University
Dr. Rakjinda Wattanalai
Siam University
Dr. Adrian Roderick Plant
Mahasarakham 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

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 43 ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม 2567

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN



ขอขอบคุณภาพจาก : อาจารย์วิไลเรศ สุขเสณี
อาจารย์ประจำคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม