

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 44 Number 4 July - August 2025

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

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

ที่ปรึกษา

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

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

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

กองบรรณาธิการ

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

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

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พักรัตน์ไฉ่ จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสิญฤทธิ์

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

ผักตบชวาภายใต้แนวทาง “เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy)”:

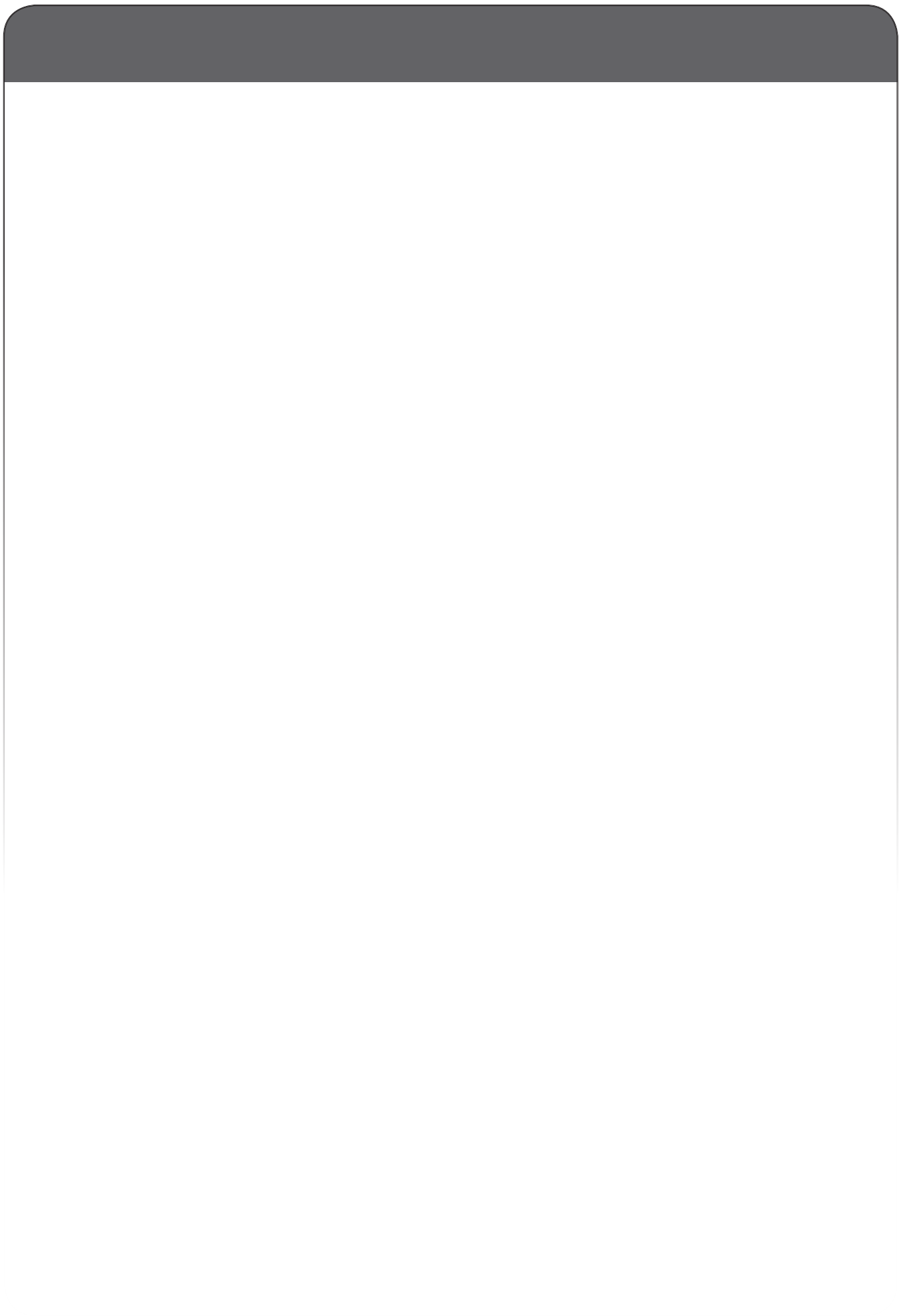
ผักตบชวา มีชื่อสามัญ คือ water hyacinth ชื่อวิทยาศาสตร์ *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms เป็นพืชที่กำเนิดในบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยเมื่อร้อยกว่าปีก่อน จัดเป็นพืชต่างถิ่นที่รุกราน หรือ invasive alien species (IAS) ซึ่งหมายถึง ชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่แพร่กระจายเข้ามาในพื้นที่นอกกำเนิดแล้วสามารถตั้งถิ่นฐานและมีการแพร่กระจายได้ธรรมชาติ เป็นชนิดพันธุ์เด่นในสิ่งแวดล้อมใหม่ ในประเทศไทยมีพืชที่ถูกจัดในกลุ่มนี้ มีมากกว่า 100 ชนิด

การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมภายใต้ BCG model คือ เป้าหมายความยั่งยืนของประเทศไทย และส่งผลในทางบวกต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้แนวทางนี้ มีหลากหลายหน่วยงานของภาครัฐ ได้มอง IAS ชนิดต่างๆ ในเชิงบวก ผักตบชวา เป็นตัวอย่างที่โดดเด่น กล่าวคือ ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ตามพันธกิจของหน่วยงาน อาทิ สำนักวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน มีโครงการเปลี่ยนผักตบชวาให้มีมูลค่า เช่น การทำไม้อัดจากผักตบชวา สถานีทดลองอาหารสัตว์ ของกรมปศุสัตว์ พัฒนาอาหารสัตว์ที่มีส่วนประกอบของผักตบชวา การใช้ประโยชน์จากเส้นใย การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เป็นต้น การมองผักตบชวา ในมุมของโอกาส ทำให้เกิดนวัตกรรมที่มีต้นน้ำจากผักตบชวา พืชทุกชนิดโดยพื้นฐานแล้วแม้ว่าจะใช้ประโยชน์ในมุมของปัจจัยสี่ ไม่ได้ พืชทุกชนิดเป็นผู้ปรับเปลี่ยนแก๊สที่ทำให้โลกร้อนขึ้น คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ได้ออกซิเจน โดยกระบวนการ การสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) เกิดขึ้นในบรรยากาศของโลก

ข้อสังเกตของบรรณาธิการในมุมมองของการใช้ประโยชน์จากพืชกลุ่ม IAS คือ การเผยแพร่ผลงานที่เป็นนวัตกรรมที่ถูกสร้างขึ้นยังจำกัดอยู่ในวงแคบเฉพาะนักวิชาการ โจทย์ที่ต้องแก้ไข คือ ทำอย่างไร นวัตกรรม เหล่านี้จะลงสู่การรับรู้ และนำไปสู่การปฏิบัติในวงกว้าง เป็นวิธีการ หรือวิถีชีวิตประจำวัน หรือ เทศกาล หรือฤดูกาล ของชุมชนท้องถิ่นทั่วไทย

ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ประเทพา

บรรณาธิการ



สารบัญ

Agricultural Science

- การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าวเปลือก 307
Development of solar rotary dryer combined with a heater system by utilizing the roof of house as a solar collector for paddy drying
ธานินทร์ รัชโพธิ์, ปิริยะ ปราณีกิจ, กรรณิกา สายาพัฒน์, วาริษา แก้วคำ, วิทยา ตัญศึกตา และ สายสวรรค์ โทวรรณ
Thanin Rudchapo, Piriya Praneekit, Kannika Sayaphat, Varisa Kaewkum, Wittaya Tuisakda and Saisawan Towanna

- ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อลักษณะผลของฟักทองสายพันธุ์แท้ 314
Genotype environment interactions on fruit characteristics in pumpkin inbred lines
ธนวินท์ เกิดจรงกรัก, วรศรา แสนมี, วชิรญา อิมสบาย และ อัญมณี อาวูชานนท์
Tanawin Kirdjongrak, Warisara Saenmee, Wachiraya Imsabai and Anyamanee Auvuchanon

- ผลของการเติมกากน้ำตาลและปุ๋ยฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ 324
Effects of adding molasses and phosphorus fertilizer to thai dessert factory wastewater for biogas production through anaerobic digestion system
ณภัทร งามสิริเกียรติ, นพวรรณ เสมวิมล, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, มัลลิกา ศรีชมภู, จุลบุตร จันทรสุรีย์, นีรุต อุปนันท์ และ ภาวีน วิจิตรตระการ
Napat Ngamsirikiata, Noppawan Semvimola, Thanit Pattamapitoona, Onanong Phewnila, Manlika Srichomphu, Chulabut Chanthasoon, Nirut Uppanunt and Pavin Wichittrakarn

Biological Science

- ความหลากหลายชนิดของพรรณไม้ในเส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ (วัดเขาจันทร์งาม) ในอุทยานธรณีโคราช อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา 334
Species diversity of plants in nature trail at Wat Loet Sawat (Khao Chan Ngam) in Koran Geopark, Sikhio District, Nakhon Ratchasima Province
ธีระ ธรรมวงศา และ สายใจ ปอสูงเนิน
Theera Thummavongsa and Saijai Posoongnoen

Chemistry

- ผลของการเติมพืชสมุนไพรต่อคุณสมบัติทางเคมี จุลินทรีย์ และคุณภาพของแฮมหมู 345
Effects of adding medicinal plants on chemical properties, microbial, and quality of Nham (Fermented pork)
พรทิพพา พิณญาพงษ์, จิตติพร เทียรณินทุกล และ อัมพวัน วิริยะรัตนกุล
Pomtippha Pinyaphong, Thitiphorn Thiankhanithikun and Amphawan Wiriyarattanakul

- อิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันสำหรับการตรวจวัดที่ว่องไวของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินที่ตกค้างในน้ำนมดิบ 356
A competitive immunosensor for sensitive detection of neomycin residues in raw milk
เจ้ฮาซัน เจ๊ะอบง และ กัญญารัตน์ โมคกุล
Chehasan Cheubong and Kanyarat Mokkal

Geoinformatics Science

- การประมาณปริมาณน้ำฝนโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมฮิมวาริ-9: กรณีศึกษาจังหวัดนครสวรรค์ 368
Rainfall estimation using Himawari-9 satellite data: A case study of Nakhon Sawan Province
นารธิป เฟ่งพิศ
Narathip Phengphit

Health Science

- การเตรียมและศึกษาความคงตัวในการเก็บรักษาซีรัมเสมือนจริง สำหรับการตรวจกรองแอนติบอดีโดยวิธีหลอดทดลองและวิธีคอลัมน์แอกกลูตินเนชัน 378
Preparation and storage stability of virtual serum for antibody screening by conventional tube test and column agglutination test
อังสนา โยธินารักษ์ และ จิราภรณ์ เกตุดี
Aungsana Yothinarak and Jiraporn Gatedee

Physical Science

- การปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิด Top-Lit Up-Draft (TLUD) แบบระบบบังคับลมและแบบธรรมชาติ 385
Improving thermal performance of Top-Lit Up-Draft (TLUD) biomass stoves with forced and natural draft systems
นุชลี ทิพย์มณฑา, พลชัย ขาวนวล และ สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์
Nuchalee Thipmonta, Palachai Khaonuan and Somboon Prasongchan

- การศึกษาเทคนิคการทำให้ปรากฏขึ้นและระยะเวลาคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน 396
Study of the techniques for enhancing the visibility and durability period of latent fingerprints on melamine-coated wood
นิช วงศ์สงจำ, ญาดาณัฐ อรุณรัตน์, อารีรัตน์ บุญดวง, วลัยพร ผ่องแผ้ว, วรวัช วิชชุวานิชย์ และ อัจฉรา คำยา
Nich Wongsongja, Yadanat Arunrat, Areerat Boontuang, Walaiporn Phonphan, Woratouch Wichuvanit and Ajchara Khamya

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าวเปลือก

Development of solar rotary dryer combined with a heater system by utilizing the roof of house as a solar collector for paddy drying

ธานินทร์ รัชโพธิ์^{1*}, ปิริยะ ปรานีกิจ¹, กรรณิกา สายาพัฒน์², วาริษา แก้วคำ²,

วิทยา ดุษฎีศักดิ์² และ สายสวรรค์ โทวรรณ²

Thanin Rudchapo^{1*}, Piriya Praneekit¹, Kannika Sayaphat², Varisa Kaewkum²,

Wittaya Tuisakda² and Saisawan Towanna²

Received: 1 July 2024 ; Revised: 26 August 2024 ; Accepted: 20 September 2024

บทคัดย่อ

การลดความชื้นข้าวเปลือกเป็นกระบวนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ ทำให้สามารถเก็บรักษาข้าวเปลือกให้มีคุณภาพดี อย่างไรก็ตามวิธีการลดความชื้นในข้าวเปลือกที่เคยปฏิบัติกันมามีปัญหาหลายด้าน ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าวเปลือก และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งมีดังต่อไปนี้: 1) เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน 2) ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลังคาโรงเรือน 3) ขดลวดความร้อนขนาด 700 วัตต์ และ 4) หน่วยควบคุม ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกประมาณ 33% d.b ทำการทดลองอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 16% d.b ในแต่ละการทดลองจะอบแห้งข้าวเปลือกครั้งละประมาณ 300 g ที่อุณหภูมิ 55 60 และ 65 °C ผลการวิจัยมีดังนี้ ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 3.75-4.92 h และ 13.20-16.64 kW-h ตามลำดับ ค่า อัตราการอบแห้ง (DR) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0064-0.0113 kg/h และ 309.64-525.78 kW-h/kg ตามลำดับ ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C จะมีค่า DR สูงที่สุด และ SEEC ต่ำที่สุด การอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C จะมีค่า DR ต่ำที่สุด และ SEEC สูงที่สุด

คำสำคัญ: อบแห้งข้าวเปลือก, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุน, ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง, ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลังคาโรงเรือน

Abstract

Paddy moisture reduction is an important post-harvest management process for the maintenance of good-quality paddy. However, the traditional methods for reducing moisture in paddy often face several problems. Therefore, this research aims to solve such a problem by developing a solar rotary dryer combined with a heater system that utilizes the roof of a house as a solar collector for paddy drying and by studying the efficiency of the dryer. The main components of the dryer included: 1) rotary dryer, 2) roof of the house as a solar collector, 3) a 700-watt heater, and 4) a controller unit. The initial moisture content of the paddy was approximately 33% d.b. The drying experiment was conducted until the final moisture content reached approximately 16% d.b. In each experiment, approximately 300 g of paddy was dried at temperatures of 55, 60, and 65 °C. The results of the research are as follows: The drying time ranged from 3.75 to 4.92 hours, and the electrical energy used ranged from 13.20 to 16.64 kW-h. The drying rate (DR) values ranged

¹ อาจารย์, สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

² นักศึกษา, ครุศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

¹ Lecturer, Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University

² Students, Bachelor of Education (Physics), Faculty of Education, Rajabhat Mahasarakham University

* Corresponding author: E-mail: thanin0003@gmail.com

from 0.0064 to 0.0113 kg/h, while the specific electrical energy consumption (SEEC) values ranged from 309.64 to 525.78 kW-h/kg. The highest DR and the lowest SEEC at a drying temperature of 65 °C. Drying at 55 °C yielded the lowest DR and the highest SEEC.

Keywords: Paddy drying, solar-rotary dryer, dryer efficiency, the roof of the house as a solar collector

บทนำ

จังหวัดมหาสารคามมีพื้นที่ทั้งหมด 3,307 ล้านไร่ เป็นพื้นที่เกษตรกรรม 2,818,172 ไร่ (85.22% ของพื้นที่ทั้งหมด) เป็นพื้นที่ปลูกข้าวถึง 2,130,023 ไร่ (กลุ่มยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อพัฒนาจังหวัด, 2566) ดังนั้นประชากรส่วนใหญ่จึงประกอบอาชีพทำนา ข้าวจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัด ซึ่งความชื้นของข้าวเปลือกเมื่อเก็บเกี่ยวใหม่จะมีค่าประมาณ 20 ถึง 25% wet basis (w.b.) หรือ 25 ถึง 33% drybasis (d.b) (อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว และคณะ, 2565) ดังนั้นการลดความชื้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญ (สุชาติ ธนสุขประเสริฐ และคณะ, 2555) ซึ่งการลดความชื้นข้าวให้มีค่าประมาณ 12-14% w.b. หรือ 14 ถึง 16% d.b (Jittanit *et al.*, 2010) จะสามารถเก็บไว้ได้นานและหลีกเลี่ยงการเสื่อมคุณภาพของข้าวเปลือกที่อาจเกิดขึ้นได้ สำหรับวิธีการลดความชื้นข้าวที่เกษตรกรนิยมปฏิบัติต่อๆ กันมา คือ การใช้วิธีตากแดดบนลานตาก (พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ, 2557) เพราะมีขั้นตอนการทำสะดวก ง่าย มีต้นทุนต่ำ (Yahya *et al.*, 2023) แต่วิธีนี้มักประสบปัญหาในเรื่องของการใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานนานหลายวัน ใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ซึ่งเกษตรกรบางรายอาจประสบปัญหาในเรื่องพื้นที่ในการตากไม่เพียงพอ ความชื้นของข้าวที่ผ่านการตากแดดไม่มีความสม่ำเสมอ ข้าวมีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดจากสภาพอากาศแปรปรวน การรบกวนจากแมลง การปนเปื้อนกับฝุ่นละออง (กฤษ ตรงจิตต์ และคณะ, 2561) และข้อจำกัดของแสงอาทิตย์ที่ไม่เอื้ออำนวยในการตาก และในระหว่างการตากบนลานต้องพลิกกลับเพื่อให้เมล็ดข้าวแห้งเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งต้องเสียค่าแรงงาน โดยตลอดกระบวนการลดความชื้น

จากปัญหาของการลดความชื้นข้าวที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปแนวทางในการแก้ไขปัญหาได้ดังนี้ 1) เนื่องจากที่ตั้งของประเทศไทยอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน 18.2 MJ/m²-day (Jangsawang, 2017) ซึ่งค่อนข้างสูง ดังนั้นการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับลดความชื้นจึงมีความเหมาะสม 2) เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ในการปฏิบัติงานและการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการดัดแปลงหลังคาโรงเรือนให้เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3) เพื่อแก้ปัญหาความชื้นของข้าวไม่สม่ำเสมอ สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง และลดพื้นที่ในการดำเนินงาน การนำเครื่องอบแห้ง

เป็นแบบถังหมุนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความเหมาะสมที่สุด 4) เพื่อให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องงานวิจัยนี้จึงใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งพลังงานเสริมเพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุน โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าวเปลือกและศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

การทดลอง

1. การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถังหมุนโดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เครื่องอบแห้งประกอบด้วย 1) เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน 2) อาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3) ขดลวดความร้อนขนาด 700 Watts (W) และ 4) ชุดควบคุม โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการพัฒนาได้ดังนี้

- ถังอบแห้งจะมีลักษณะเป็นแปดเหลี่ยมทรงกระบอกขนาด 2 m³ ยาว 1.5 m เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 m โครงสร้างทำจากเหล็กกล่องกัลวาไนซ์ขนาด 1x1" และผนังของถังอบแห้งทำมาจากเหล็กแผ่นชุบสังกะสี โดยผนังภายนอกจะถูกหุ้มด้วยฉนวนใยไนโตรลีสต้าเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

- ภายในถังอบแห้งจะติดตั้งใบกวนสำหรับคลุกเคล้าข้าวเปลือก โดยติดตั้งบริเวณผนังถังอบแห้งตลอดความยาวของถังเพื่อให้ข้าวมีการกระจายตัวและสัมผัสกับลมร้อนมากขึ้น และติดตั้งท่ออากาศร้อนจำนวน 4 ท่อ

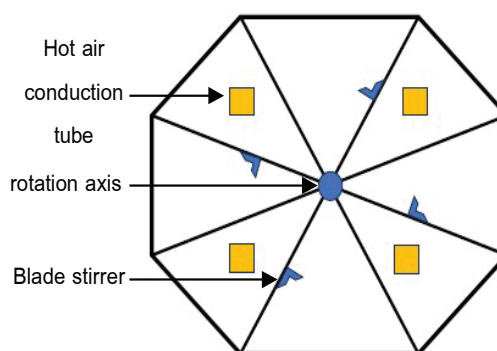


Figure 1 Characteristics inside a rotary drum.

ทำจากเหล็กกล่องกัลวาไนซ์ ขนาด 3x3" จะระบุขนาดเล็กตามความยาวของท่อเพื่อกระจายอากาศร้อนให้ทั่วถึงอบแห้ง โดยปลายท่อด้านขาเข้าอากาศร้อนจะเป็นท่อปลายเปิดเพื่อให้ลมร้อนผ่านเข้าไป ส่วนปลายท่ออีกด้านหนึ่งจะถูกปิดไว้ ปลายท่อทั้งสองข้างของท่ออากาศร้อนจะถูกยึดติดกับผนังของปลายถึงอบแห้งทั้งสองข้างทำให้ท่ออากาศร้อนหมุนไปกับถึงอบแห้ง ซึ่งลักษณะภายในถึงหมุ่นจะแสดงดัง Figure 1

- ชุดขับเคลื่อนการหมุนถึงอบแห้ง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 3 hp เป็นต้นกำลัง มีชุดสายพานและมู่เล่ย์สองร่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18" จำนวน 2 ตัว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12" จำนวน 1 ตัว ทำให้รอบการหมุนของถึงอบแห้งประมาณ 12 รอบต่อนาที สำหรับทดรอบของมอเตอร์ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Reduce motor speed with pulley sets.

- การสร้างอากาศร้อนสำหรับอบแห้งข้าวจะอาศัยหลักการของเครื่องสำหรับทำเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และเนื่องจากข้อจำกัดของความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นเพื่อทำให้กระบวนการอบแห้งดำเนินไปอย่างต่อเนื่องและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ งานวิจัยนี้จึงใช้ฮีตเตอร์แบบครีบน้ำมัน 350 W จำนวน 2 ตัว (ขนาดฮีตเตอร์จะพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการ ปริมาตรของตู้อบ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง) เป็นแหล่งพลังงานความร้อนเสริม ซึ่งช่วยลดความร้อนจะถูกควบคุมการทำงาน (ปิด-เปิด) ด้วยอุณหภูมิอากาศขาเข้าถึงอบแห้ง (ตั้งไว้ที่ 55, 60 และ 65°C) โดยอุณหภูมิอากาศขาเข้าถึงอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller รุ่น HW-W3001-220VAC Accuracy $\pm 0.2^\circ\text{C}$) ซึ่งจะปิดเมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ จากนั้นจะเปิดอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้

- พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 28.62 m^2 และเนื่องจากการกำหนดความยาวของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไว้ที่ 6 m ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความกว้าง 4.8 m ซึ่งโครงสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะทำด้วยเหล็กกล่อง กัลวาไนซ์ขนาด 1 x 1" และ 3 x 2" เอียงทำมุมกับแนวระดับ 15° หันหน้าไปทางทิศใต้ (Figure 3(A)) โดยแผงรับรังสีอาทิตย์ (Solar absorber) จะมีลักษณะเป็นลอนทำจากหลังคาเมทัลชีทลอนเหลี่ยมสีดำด้าน (Figure 3(B)) ส่วนด้านล่างจะมีการเจาะช่องสำหรับต่อกับท่ออากาศร้อน (Figure 3(C)) เพื่อนำอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังถึงอบแห้ง ด้านบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ปิดด้วยแผ่นหลังคาใสไฟเบอร์กลาสลอนสังกะสี (Figure 3(D)) โครงสร้างภายในและด้านล่างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีการหุ้มด้วยฉนวนยางไนไตรล์สีดำ

- ติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง 12 Volt (V) สำหรับพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังถึงอบแห้ง โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับพัดลม และ



Figure 3 A solar collector structure.

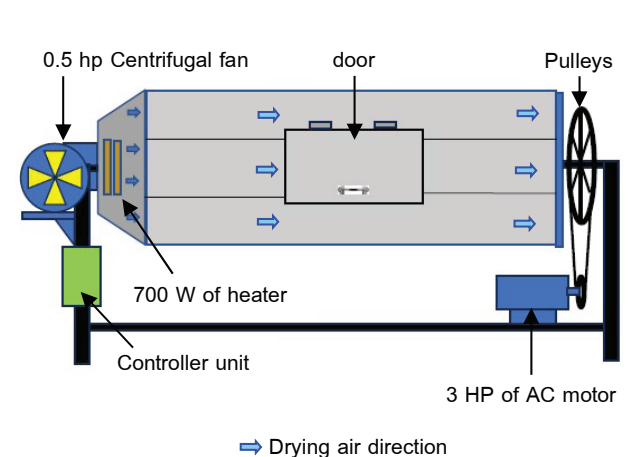


Figure 4 The components of rotary dryer.

ใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบโค้งหน้าขนาดมอเตอร์ 0.5 hp เป่าลมร้อนเข้าถึงอบแห้ง ดังแสดงใน Figure 4

- นำส่วนประกอบมาประกอบเข้าด้วยกันจะได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุ่ร่วมกับระบบ ฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้ง ข้าวเปลือก ดังแสดงใน Figure 5

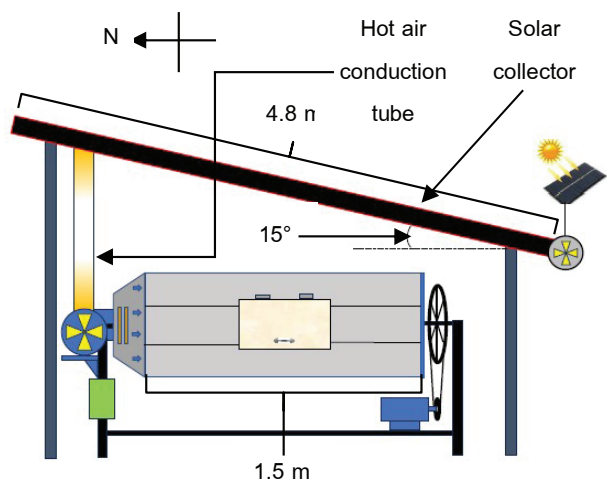


Figure 5 The dryer is complete.

2. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุ่ร่วมกับระบบฮีตเตอร์โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2.1 การเตรียมข้าวเปลือก (ข้าวเหนียว กข 6) ทำการเพิ่มความชื้นให้เมล็ดข้าว (Rewet) ให้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33% dry basis (d.b) โดยคำนวณหาปริมาณน้ำเพื่อใช้ในการเพิ่มความชื้น จากนั้นนำข้าวและน้ำใส่ลงไปในกล่องภาชนะปิด เก็บรักษาไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 7 วัน ในระหว่างการเก็บรักษามีเขย่ากล่องภาชนะใส่ข้าวเพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปยังเมล็ดข้าวได้อย่างทั่วถึงและดียิ่งขึ้น

2.2 นำข้าวเปลือกที่ผ่านการเพิ่มความชื้นประมาณ 250 gram (g) ใส่ในตะแกรงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 cm สูง 16.5 cm ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ภายในถึงอบแห้ง อบแห้งตั้งแต่วันที่ 9.00 น. ที่อุณหภูมิ 55 60 และ 65 °C โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.3 การติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวในแต่ละเวลาการอบแห้ง ทำได้โดยนำตะแกรงทรงกระบอกที่บรรจุตัวอย่างข้าวเปลือกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอล (OHAUS รุ่น PA2102C precision of 0.01 g) ทุกๆ 15 นาที อบแห้งจนข้าวเปลือกมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 16% d.b.

2.4 ในระหว่างการอบแห้งเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศทางเข้าถึงอบแห้ง วัดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบฮีตเตอร์ด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke 1735)

2.5 หลังการอบแห้งนำตัวอย่างมาหาค่าความชื้นสุดท้าย

3. การคำนวณประสิทธิภาพ

3.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) สามารถหาได้จากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้การอบแห้ง (ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในมอเตอร์ไฟฟ้า พัดลมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และระบบฮีตเตอร์) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ มีหน่วยเป็น kW-h/kg ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ (จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ, 2563)

$$SEEC = \frac{W_E}{m_w} \quad (1)$$

m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง (kg)

W_E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kW-h)

3.2 อัตราการอบแห้ง (DR) (จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ, 2563) สามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้งมีหน่วยเป็น kg/h ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่

m_i คือ มวลวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)

m_f คือ มวลวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

4. สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ($p < 0.05$)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การศึกษาระยะเวลา และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เป็นการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตอากาศร้อนร่วมกับขดลวดความร้อน (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลังคาโรงเรือนสามารถสร้างอากาศร้อนสำหรับอบแห้งให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 54-60 °C ส่งผลให้ระบบฮีตเตอร์ ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง กระบวนการอบแห้งสามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเมื่อทำการศึกษาระยะเวลา และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จะได้ผลการศึกษาดังแสดงใน Table 1

Table 1 The drying time and electricity consumption.

Temperature (°C)	Drying time (h)	Electrical Energy (kW-h)
55	4.92±0.38 ^a	16.64±1.16 ^a
60	4.25±0.43 ^{ab}	14.42±1.31 ^{ab}
65	3.75±0.43 ^b	13.20±1.31 ^b

Note: Means with different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

จาก Table 1 พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งจะแปรผันตรงกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง โดยระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.75-5.15 ชั่วโมง และ 13.94-17.64 kW-h ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 3.75 ชั่วโมง ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 13.20 kW-h ส่วนสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด 4.92 ชั่วโมง ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด 16.64 kW-h ซึ่งระยะเวลาในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนโดยมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนที่นิยมกันอย่างแพร่หลายจะใช้รูปแบบของสมการ Arrhenius (Aregbesola *et al.*, 2015) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้การแพร่ของความร้อนจากภายในออกมายังผิวภายนอกเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Utari *et al.* (2022) สำหรับการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จะแสดงใน Figure 5

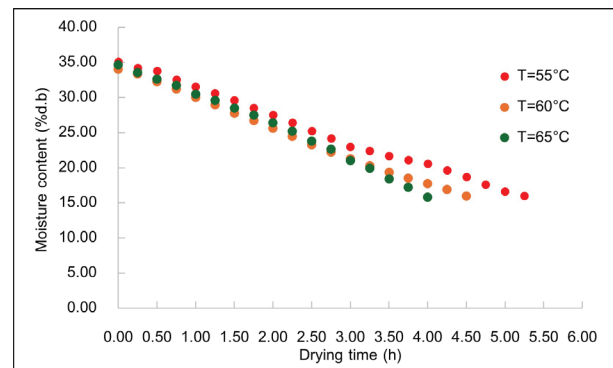


Figure 5 Moisture changes at drying temperatures of 55, 60 and 65 °C

จาก Figure 5 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลง ปริมาณความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้ง ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรงทุกสภาวะการอบแห้ง เนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถึงหมุนมีการพลิกกลับข้าวในระหว่างการอบแห้ง ทำให้เมล็ดข้าวสัมผัสกับอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้การลดลงของความชื้นมีความสม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะการลดลงของความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งที่ได้จากงานนี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ กฤช ทรองจิตต์ และคณะ (2561)

2. ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุน โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุน โดยอาศัยหลังคาโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าว อุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน โดยจะพิจารณาจาก SEEC และ DR ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงดัง Table 2

Table 2 The analysis of DR and SEEC values.

Temperature (°C)	DR (kg/h)	SEEC (kW-h/kg)
55	0.0064	525.78
60	0.0097	346.59
65	0.0113	309.64

Note: Means with different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.

จาก Table 2 พบว่า ค่า DR และ SEEC มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0064-0.0113 kg/h และ 309.64-525.78 kW-h/kg โดยเมื่อพิจารณาค่า DR ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C จะมีค่า DR สูงที่สุด 0.0113 kg/h ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C จะมีค่า DR ต่ำที่สุด 0.0064 kg/h ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่า DR แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอบแห้ง เมื่อพิจารณาค่า SEEC ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า ที่สภาวะการอบแห้งอุณหภูมิ 65 °C จะมีค่า SEEC ต่ำที่สุด 309.64 kW-h/kg ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C จะทำให้มีค่า SEEC สูงที่สุด 525.78 kW-h/kg ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า SEEC แปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิอบแห้ง

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลักการโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้งข้าว สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 3.75-4.92 ชั่วโมง และ 13.20-16.64 kW-h ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการอบแห้ง (t) จะแปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิอบแห้ง และพลังงานไฟฟ้า (W_E) แปรผันแบบผกผันอุณหภูมิอบแห้ง

2. การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบถึงหมุนร่วมกับระบบฮีตเตอร์ โดยอาศัยหลักการโรงเรือนเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พบว่า อัตราการอบแห้ง (DR) และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0064-0.0113 kg/h และ 309.64-525.78 kW-h/kg โดยค่า DR จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบแห้ง ส่วนค่า SEEC จะแปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิอบแห้ง

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยครั้งต่อไป สามารถศึกษาพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งในด้านอื่นๆ เช่น ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ หรือศึกษาพารามิเตอร์ด้านคุณภาพของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง เช่น เปอร์เซ็นต์การแตกหัก คุณภาพด้านสี เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อพัฒนาจังหวัด. (2566). แผนพัฒนาจังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2566-2570. สำนักงานจังหวัดมหาสารคาม. https://www.mahasarakham.go.th/plan_sara/plan66_70.pdf
- กฤษ ตรีจติต, วัชรานนท์ จุฑาจันทร์, และลาพูน เหลลราช. (2561). เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกพลังงานแสงอาทิตย์แบบถอดประกอบอย่างง่าย. *วารสารวิทยาศาสตร์คชสส*, 40(2), 76-90.
- จารุวัฒน์ เจริญจิต, สิทธิพร บุญญานุวัตร, และอุดร นามเสม. (2563). อิทธิพลของแหล่งความร้อนสำหรับปั๊มความร้อนในระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอาทิตย์แบบเรือนกระจก. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 12(2), 208-222.
- พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโซนาค, มุสตาฟา ยะภา, และประชา บุญยานิชกุล. (2557). การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 9(1), 68-74.
- อภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว, กระวี ตรีอำรรค, และเทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2565). แบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 8(2), 99-109.
- Aregbesola, O. A., Ogunsina, B. S., Sofolahan, A. E., & Chime, N. N. (2015). Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels. *Nigerian Food Journal*, 33(1), 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.nifoj.2015.04.012>
- Jangsawang, W. (2017). Meat products drying with a compact solar cabinet dryer. *Energy Procedia*, 138, 1048-1054. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.111>
- Jittanit, W., Saeteaw, N., & Charoenchaisri, A. (2010). Industrial paddy drying and energy saving options. *Journal of Stored Products Research*, 46(4), 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.05.003>

- Utari, F. D., Yasintasia, C., Ratridewi, M., A'yuni, D. Q., Kumoro, A. C., Djaeni, M., & Asiah, N. (2022). Evaluation of paddy drying with vertical screw conveyor dryer (VSCD) at different air velocities and temperatures. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 174, 108881. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108881>
- Yahya, M., Fahmi, H., Hasibuan, R., & Fudholi, A. (2023). Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อลักษณะผลของฟักทองสายพันธุ์แท้

Genotype environment interactions on fruit characteristics in pumpkin inbred lines

ธนวินท์ เกิดจรงค์¹, วริศรา แสนมี¹, วชิรญา อิมสabay¹ และ อัญมณี อวูชานนท์^{1*}

Tanawin Kirdjongrak¹, Warisara Saenmee¹, Wachiraya Imsabai¹ and Anyamanee Auvuchanon^{1*}

Received: 17 July 2024 ; Revised: 2 September 2024 ; Accepted: 19 September 2024

บทคัดย่อ

การตอบสนองของพืชแต่ละสายพันธุ์ต่อสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกแตกต่างกันมีผลต่อลักษณะปรากฏและคุณภาพผลผลิต ดังนั้นจึงประเมินลักษณะผลฟักทองทั้งหมด 29 สายพันธุ์ ประกอบด้วย สายพันธุ์แท้ 24 สายพันธุ์ เปรียบเทียบกับสายพันธุ์พื้นเมือง 3 สายพันธุ์และสายพันธุ์การค้า 2 สายพันธุ์ ปลูกในสองฤดูกาลระหว่างฤดูหนาวและฤดูฝน จากการทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนจากสองฤดูกาล พบว่าลักษณะที่ทดสอบมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันในสองฤดูกาล จึงวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม พบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาลต่อลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อ ($P < 0.01$) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏ พบว่าลักษณะของน้ำหนักและความหนาเนื้อได้รับอิทธิพลหลักจากฤดูกาล ในขณะที่ลักษณะความแน่นเนื้อได้รับอิทธิพลหลักจากพันธุกรรมและพบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาล นอกจากนี้ ลักษณะน้ำหนักผลมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับความหนาเนื้อทั้งในฤดูหนาวและฤดูฝน ($P < 0.01$) $r = 0.85^{**}$ และ $r = 0.83^{**}$ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle component analysis, PCA) บนพื้นฐาน correlation matrix สามารถอธิบายความแปรปรวนใน PC1 และ PC2 ได้เท่ากับ 56.2 และ 21.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบความหลากหลายของลักษณะผลฟักทอง ทำให้สามารถจำแนกฟักทองสายพันธุ์แท้ที่มีน้ำหนักผลและความหนาเนื้อสูงเทียบเท่าพันธุ์การค้า 10 สายพันธุ์ จำแนกกลุ่มสายพันธุ์แท้ที่มีความแน่นเนื้อสูง 13 สายพันธุ์ จากการศึกษาครั้งนี้สามารถคัดเลือกสายพันธุ์แท้ที่มีความโดดเด่นของลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อ ได้แก่ สายพันธุ์แท้ RT4, RT15, RT4/RT10–3s–3s, Pach13–4s และ Paka2

คำสำคัญ: *Cucurbita moschata*, น้ำหนัก, ความหนาเนื้อ, ความแน่นเนื้อ, การปรับปรุงพันธุ์

Abstract

The response of different plant cultivars to different environmental conditions affects to phenotype and quality of production. A total of 29 pumpkin lines consisting of 24 inbred lines, 3 landraces, and 2 commercial varieties were evaluated. The plants were grown in two seasons that were winter and the rainy season. Homogeneity of variance from 2 seasons was tested. The result shows the variance is no different between the 2 seasons in all traits. Therefore, a combined analysis of variance was tested. There was interaction between lines and seasons that affected to fruit characteristics, fruit weight, flesh thickness, and flesh firmness ($P < 0.01$). Phenotypic variance indicated that the characteristics of weight and flesh thickness were affected by the season, while the major effect of flesh firmness character was genetic factors and the interaction between lines and seasons. Additionally, fruit weight had a significantly positive correlation with flesh thickness in both winter and rainy seasons ($P < 0.01$), with $r = 0.85^{**}$ and $r = 0.83^{**}$, respectively. Principal Component Analysis (PCA) based on the correlation matrix explained 56.2% of the variance in PC1 and 21.3% in PC2. This study found diversity of fruit characters of pumpkin lines and identified 10 inbred lines with high fruit weight and flesh thickness compared with commercial cultivars. Furthermore, 13 inbred lines were classified as having high flesh firmness. From this study, the outstanding inbred lines were selected for their traits in fruit weight, flesh thickness, and flesh firmness that were RT4, RT15, RT4/RT10–3s–3s, Pach13–4s, and Paka2.

Keywords: *Cucurbita moschata*, weight, thickness, firmness, breeding

¹ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

¹ Department of Horticulture, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom

* Corresponding author: E-mail: agrana@ku.ac.th

บทนำ

ฟักทอง (*Cucurbita moschata*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย โดยในปี 2566 พบว่ามีพื้นที่การเพาะปลูก 23,436.10 ไร่ ให้ผลผลิตรวม 49,714 ตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2566) เนื่องจากฟักทองมีสารสำคัญหลายชนิด เช่น วิตามินซี วิตามินอี แมกนีเซียม และสารเบต้าแคโรทีน จากประโยชน์ของสารสำคัญเหล่านี้ทำให้ฟักทองถูกนำมาบริโภคและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ รวมทั้งสารสกัดต่างๆ ที่มีประโยชน์และมูลค่าสูง (Zhou *et al.*, 2007) นอกจากนี้ ในการเลือกฟักทองของผู้บริโภคยังมีความต้องการฟักทองที่มีน้ำหนักผลและความแน่นเนื้อสูง แต่อย่างไรก็ตามฟักทองพันธุ์การค้าในประเทศไทยนั้น มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทั้งรูปทรง ผิวผลและเนื้อสัมผัส และจากการศึกษาความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของฟักทองพันธุ์การค้าพบว่ามีความใกล้ชิดทางพันธุกรรมสูง (อัญมณี อวูซันนท์ และปณาลี ภูวกรกุลชัย, 2559)

โครงการปรับปรุงพันธุ์จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการปรับปรุงพันธุ์ฟักทองเพื่อเพิ่มความหลากหลายของลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยใช้สายพันธุ์การค้าและพันธุ์พื้นเมืองที่รวบรวมจากภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย (รัชชานนท์ ทองแผ่น และคณะ, 2562; วริศรา แสนมี และคณะ, 2565) มาปรับปรุงพันธุ์ฟักทองเพื่อให้ได้ฟักทองสายพันธุ์แท้ (inbred line) ที่เกิดจากการคัดเลือกและผสมตัวเองซ้ำๆ ประมาณ 5–8 รุ่น อย่างไรก็ตามฟักทองสายพันธุ์แท้ที่ได้นั้นขาดข้อมูลเกี่ยวกับศักยภาพและลักษณะทางการเกษตรเนื่องจากเป็นสายพันธุ์ที่มีการปรับปรุงพันธุ์ขึ้นใหม่ นอกจากนี้ลักษณะปรากฏ (phenotype) อาทิ น้ำหนักผล ความหนาเนื้อ ปริมาณสารพฤษเคมีในฟักทองและพืชชนิดอื่นๆ มีการแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับปัจจัยจากพันธุกรรมและปัจจัยจากสภาพแวดล้อม เช่น สายพันธุ์, พื้นที่ปลูก, ฤดูกาล และปีที่เพาะปลูก เป็นต้น รวมทั้งปัจจัยร่วมระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม โดยการศึกษาของ Kumar *et al.* (2022) พบว่าลักษณะความหนาเนื้อของฟักทอง 6 สายพันธุ์ที่เพาะปลูกใน 3 สถานที่ มีความหนาเนื้อมีความแปรปรวนระหว่าง 2.03–2.82 เซนติเมตร ซึ่งได้รับผลจากอิทธิพลร่วมระหว่างสภาพแวดล้อมและพันธุกรรม ในขณะที่น้ำหนักผลได้อิทธิพลหลักจากสภาพแวดล้อม ตรงข้ามกับการศึกษาของ Aragão *et al.* (2015) พบว่าความหนาเนื้อของเมล่อน 9 สายพันธุ์จากแหล่งปลูก 3 สถานที่ ในช่วง 3 ปี ไม่ได้รับอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม นอกจากนี้การศึกษาปริมาณผลผลิตของฟักทอง (*Cucurbita pepo*) ในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนน้อย (108 มิลลิเมตร) และ อุณหภูมิสูง (28 องศาเซลเซียส) มีปริมาณผลผลิต ลดลงประมาณ 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพาะปลูกในช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสูง (120 มิลลิเมตร) และอุณหภูมิต่ำ (27 องศาเซลเซียส) (Oloyede & Adebooye, 2013) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปลูกประเมิน

ลักษณะของสายพันธุ์ฟักทองในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์สำหรับการเพาะปลูกให้เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมนั้น อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงพันธุ์ฟักทองเพื่อผลิตฟักทองสายพันธุ์ลูกผสม จำเป็นต้องพัฒนาสายพันธุ์แท้เพื่อใช้เป็นพ่อแม่พันธุ์ ซึ่งการทดสอบสายพันธุ์แท้ในหลายสภาพแวดล้อม และประเมินปฏิกริยาร่วมระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อมเพื่อเป็นข้อมูลในการคัดเลือกสายพันธุ์แท้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ งานวิจัยด้านการประเมินสายพันธุ์แท้ฟักทองในสภาพแวดล้อมที่ต่างกันยังมีไม่มากนัก

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ น้ำหนักผล, ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อของฟักทองสายพันธุ์แท้ที่ปลูกในฤดูกาลที่ต่างกัน ได้แก่ ฤดูหนาวและฤดูฝน เพื่อคัดเลือกฟักทองสายพันธุ์แท้ที่มีความดีเด่นของลักษณะทางสัณฐานวิทยา รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของฤดูกาลต่อฟักทองสายพันธุ์แท้เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาฟักทองพันธุ์ลูกผสมต่อไป

การทดลอง

1. สายพันธุ์ฟักทองที่ใช้ในการศึกษา

ฟักทอง 29 สายพันธุ์ ประกอบด้วยสายพันธุ์ฟักทองแท้ 24 สายพันธุ์ พันธุ์ฟักทองพื้นเมือง 3 สายพันธุ์ซึ่งคัดเลือกมาจากฟักทองพื้นเมืองที่รวบรวมมาจากจังหวัด กาญจนบุรี นครปฐม และ เชียงใหม่ และฟักทองพันธุ์การค้า 2 พันธุ์

2. การทดสอบในสภาพแปลงปลูก

ทำการเพาะปลูกฟักทองทั้ง 29 สายพันธุ์ ในสองฤดูกาล ได้แก่ ฤดูหนาว ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2565 และฤดูฝน ในช่วงเดือนมิถุนายนถึง เดือนกันยายน พ.ศ. 2565 ณ แปลงทดลองภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม (14.0285°N, 99.9722°E) โดยข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความชื้น แสดงใน Table 1 (สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐม, 2566)

เตรียมตัวอย่างก่อนทำการปลูกในแปลงทดลองโดยเพาะเมล็ดในถาดหลุมเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นย้ายปลูกลงแปลงทดลองขนาดกว้าง 1.2 เมตรและยาว 35 เมตร ซึ่งทำการคลุมแปลงปลูกด้วยพลาสติกคลุมแปลง ทำการปลูกด้วยวิธีการขึ้นค้ำ ระยะระหว่างแถว 80 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 1 เมตร จำนวนสายพันธุ์ละ 8 ต้น ในระหว่าง การเพาะปลูกทำการให้น้ำวันละ 2 ครั้ง ได้แก่ ช่วงเช้าและเย็น และให้ปุ๋ยสูตร 16–16–16 สัปดาห์ละ 1 ครั้ง จนกระทั่งเก็บเกี่ยว โดยเก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่ออายุผลประมาณ 35–40 วันหลังดอกบาน ควบคุมการสังเกตดัชนีการเก็บเกี่ยวของฟักทอง ได้แก่ ผลขึ้นทรวง หนดเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและขั้วผลไม่มีหนาม

3. การเก็บข้อมูล

หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตฟักทอง ทำการบันทึกน้ำหนักผลจำนวน 6 ผลต่อสายพันธุ์ และประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ ความหนาเนื้อด้วยเครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยวัดความหนาเนื้อของฟักทองที่ทำการผ่าครึ่งทั้งสองซีก และบันทึกผลในหน่วยมิลลิเมตร และความแน่นเนื้อ ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Penetrometer, FACCHINI S.R.L. FT 327) ด้วยหัวกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร วัดความแน่นเนื้อบริเวณกึ่งกลางของเนื้อฟักทองที่ทำการผ่าครึ่งทั้ง 2 ซีก โดยวัดซีกละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่วัดได้ในหน่วยกิโลกรัมไปทำการคำนวณความแน่นเนื้อในหน่วยนิวตันต่อตารางเซนติเมตร

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Random Desing, CRD) และจัดสิ่งทดลอง (treatment) แบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาล วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) ของลักษณะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Paleontological Statistics version 4.17 (Past 4.17)

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

เมื่อ Y_{ijk} คือ ค่าสังเกตสายพันธุ์ที่ i ฤดูกาลที่ j และซ้ำที่ k , μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร, α_i คือ อิทธิพลของสายพันธุ์ที่ i , β_j คือ อิทธิพลของฤดูกาลที่ j , $\alpha\beta_{ij}$ คือ อิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์ที่ i และฤดูกาลที่ j และ ε_{ijk} คือ ความผันแปรอันเนื่องมาจากสายพันธุ์ที่ i และฤดูกาลที่ j โดย i คือ สายพันธุ์ฟักทอง 29 สายพันธุ์, j คือ ฤดูฝนและฤดูหนาว และ k คือ จำนวนซ้ำ

วิเคราะห์ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวน (Homogeneity of variance) จากการเปรียบเทียบค่า $F_{\max}$ ตามวิธี Hartley's $F_{\max}$ (ค่าผลหารระหว่าง mean square error ในแต่ละฤดูกาล) กับค่า F จากการเปิดตารางที่ df เท่ากับ 28 และ K เท่ากับ 2 (ฤดูหนาวและฝน) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.77 (ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01) หากค่าจากการคำนวณน้อยกว่าค่าจากตารางแสดงว่าค่าความแปรปรวนในสองฤดูกาลไม่แตกต่างกัน (Hartley, 1950)

วิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะที่ปรากฏ (phenotypic variance) จากอิทธิพลของสายพันธุ์ ฤดูกาล และอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาล ในรูปของร้อยละ โดยใช้ค่า Mean Square ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation) และองค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) จากข้อมูลค่าเฉลี่ยของลักษณะทางสัณฐานวิทยาในฟักทองทั้งสองฤดูกาลบนพื้นฐานของ Correlation matrix เพื่อศึกษาความหลากหลายของสายพันธุ์ฟักทองด้วยโปรแกรม Past 4.17

Table 1 Rainfall, temperature, and humidity during the cropping year in the rainy and winter seasons.

Season	Month	Rainfall (mm.)	Temperature (°C)		Humidity (%)	
			Min	Max	Max.	Min.
Winter	Nov. (2021)	66.8	23.9	31.4	95.8	63.1
	Dec. (2021)	9.2	19.5	29.7	93.1	51.6
	Jan. (2022)	10.6	19.6	32.6	96.8	49.3
	Feb. (2022)	39.8	22.2	32.5	95.4	56.1
	Mean	31.6	21.3	31.55	95.3	55.0
Rainy	Jun. (2022)	56.6	25.2	35.5	93.0	53.2
	Jul. (2022)	84.3	24.9	34.5	93.8	57.3
	Aug. (2022)	327.5	24.8	33.8	94.6	61.9
	Sep. (2022)	308.3	24.6	32.8	96.3	65.0
	Mean	194.2	24.88	34.15	94.4	59.3

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ลักษณะน้ำหนักผล, ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อของฟักทองที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ทั้ง 29 สายพันธุ์ แสดงใน Table 2 น้ำหนักผลฟักทองในฤดูหนาวมีค่าระหว่าง 334.7 ถึง 1,270.4 กรัม และในฤดูฝนมีค่าระหว่าง 426.7 ถึง 1,763.0 กรัม เมื่อทดสอบ ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนด้วย F_{max} มีค่าเท่ากับ 2.43 ซึ่งต่ำกว่าวิกฤต แสดงว่าความแปรปรวนของลักษณะน้ำหนักผลของฟักทองในสองฤดูกาลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาล และพบความแตกต่างทางสถิติของอิทธิพลร่วมของสายพันธุ์และสภาพแวดล้อมต่อลักษณะน้ำหนักผล ($P < 0.01$) แสดงใน Table 3 จากข้อมูลน้ำหนักผลของสายพันธุ์แท้ 29 สายพันธุ์พบว่า ฟักทองส่วนใหญ่ให้น้ำหนักผลในฤดูฝนสูงกว่าในฤดูหนาว มีเพียง 7 สายพันธุ์ ที่มีค่าน้ำหนักผลไม่แตกต่างกันทางสถิติในสองฤดูกาล ซึ่งเป็นฟักทองสายพันธุ์แท้ 6 สายพันธุ์ ได้แก่ RT1, RT14, RT17, Pach13-2/3, Pach13-4s และ Paka2 รวมทั้งสายพันธุ์พื้นเมือง KAN1 โดยสายพันธุ์ที่มีน้ำหนักผลสูงที่สุดในฤดูหนาวและฤดูฝนคือ สายพันธุ์ KPS(PW) (1,270.4 และ 1,763.0 กรัม ในฤดูหนาวและฤดูฝนตามลำดับ) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับสายพันธุ์พื้นเมืองจากเชียงใหม่ CM1 และ KPS(PW) รวมทั้งมี น้ำหนักผลสูงกว่าพันธุ์การค้า KT และ TT ที่นำมาปลูกทดสอบในทั้งสองฤดูกาล โดยสายพันธุ์

KPS(PW) เป็นสายพันธุ์พื้นเมืองในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกเดียวกันกับการศึกษานี้ ทำให้มีการปรับตัวได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่น แม้มีความแตกต่างของน้ำหนักผลทั้งสองฤดูกาล แต่ยังไม่ให้น้ำหนักผลสูง ส่วนสายพันธุ์ฟักทองที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์มาให้น้ำหนักผลที่ดีแตกต่างจากสายพันธุ์อื่น และสภาพแวดล้อมไม่มีอิทธิพลต่อน้ำหนักผลคือ Paka2, Pach13-2/3 และ Pach13-4S อย่างไรก็ตาม น้ำหนักผลฟักทองสายพันธุ์แท้ได้รับอิทธิพลจากฤดูกาลที่ปลูก โดยฟักทองที่ปลูกในฤดูหนาวมีขนาดผล 3 เกรด ตามมาตรฐานสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2555) กล่าวคือ มีฟักทอง 9 สายพันธุ์ที่เป็นรหัสขนาด 8 โดยมีน้ำหนักผลต่ำกว่า 500 กรัม ฟักทอง 16 สายพันธุ์ มีขนาดเทียบเท่ารหัสขนาด 7 ซึ่งฟักทองกลุ่มนี้ มีขนาดอยู่ระหว่าง >500–1,000 กรัม และมีฟักทอง 4 สายพันธุ์ที่มีน้ำหนักผลตามรหัสขนาด 6 คือน้ำหนักผล >1,000–1,500 กรัม อย่างไรก็ตาม ฟักทองที่ปลูกในฤดูฝนมีขนาดผลที่รหัสขนาด 8 เพียง 2 สายพันธุ์ รหัสขนาด 7 จำนวน 12 สายพันธุ์ และฟักทองสายพันธุ์แท้ 11 สายพันธุ์มีน้ำหนักผลที่รหัสขนาด 6 นอกจากนี้ มีฟักทองจำนวน 5 สายพันธุ์ ที่มีขนาดผลตามรหัสขนาด 5 คือ >1,500–2,000 กรัม ได้แก่ สายพันธุ์แท้ RT4 พันธุ์พื้นเมือง KPS(PW), CM1 และพันธุ์การค้า KT

Table 2 Weight, thickness, and firmness of 29 pumpkin lines in winter (WS) and rainy (RS) season

Code	Line	Weight (g.)		Thickness (mm.)		Firmness (N/cm ²)	
		WS	RS	WS	RS	WS	RS
RT1	Inbred line	385.8	495.5	12.2	13.9	481.1	613.7
RT3	Inbred line	608.8	1,307.8	17.4	23.2	309.4	344.6
RT4	Inbred line	997.3	1,543.5	21.1	24.5	448.6	526.6
RT7	Inbred line	692.8	1,262.2	17.0	21.2	403.1	392.7
RT8	Inbred line	851.7	1,174.0	13.7	19.3	384.9	315.9
RT9	Inbred line	401.5	755.0	12.3	16.5	499.3	480.5
RT10	Inbred line	334.7	675.3	12.8	16.5	475.9	537.4
RT14	Inbred line	429.5	526.5	10.8	14.0	600.7	527.9
RT15	Inbred line	750.8	1,054.2	14.8	20.9	460.3	582.5
RT17	Inbred line	608.2	776.7	15.3	17.6	553.9	585.1
Pach1-3/5	Inbred line	388.5	752.5	7.4	12.5	513.6	475.9
Pach1-4s	Inbred line	562.3	863.3	9.3	13.1	535.7	516.2
Pach1-5s	Inbred line	407.2	718.5	8.9	14.5	408.8	504.5
Pach1-7/8	Inbred line	573.3	859.7	10.6	16.0	486.3	395.3
Pach13-2/3	Inbred line	1003.2	1,087.7	22.0	20.7	369.3	524.0

Table 2 Weight, thickness, and firmness of 29 pumpkin lines in winter (WS) and rainy (RS) season (cont.)

Code	Line	Weight (g.)		Thickness (mm.)		Firmness (N/cm ²)	
		WS	RS	WS	RS	WS	RS
Pach13–3/6	Inbred line	831.3	1,085.3	21.1	21.3	375.8	403.1
Pach13–4s	Inbred line	825.7	1,012.2	18.1	22.0	486.3	598.1
Pach13–5/3	Inbred line	540.7	965.2	13.3	19.6	387.5	576.0
Pach14–1s	Inbred line	596.8	880.5	13.4	19.8	529.2	466.8
Paka1	Inbred line	861.0	1,196.8	12.3	14.4	469.4	509.7
Paka2	Inbred line	1,118.7	1,300.5	19.8	23.4	725.5	533.1
RT4/RT10–3s	Inbred line	409.2	1,002.0	9.2	20.0	578.6	495.4
RT4/RT10–5/1	Inbred line	470.4	871.8	11.0	20.0	558.6	469.6
RT4/RT10–3s–3s	Inbred line	758.5	1,303.0	16.3	30.0	565.6	440.8
KAN1	Landrace	488.0	426.7	12.6	13.4	472.0	447.3
KPS(PW)	Landrace	1,270.4	1,763.0	22.1	26.5	401.0	546.1
CM1	Landrace	1,248.8	1,544.0	22.9	28.5	577.3	444.7
TT	Commercial	565.5	820.4	12.6	16.8	486.3	390.1
KT	Commercial	690.7	1,501.5	17.4	23.7	516.2	610.4
Mean		678.3	1018.1	14.7	19.4	484.8	491.5
C.V. (%)		18.8	19.6	13.1	14.2	9.3	14.2
LSD _{GXE}		229.7		3.3		81.2	

Table 3 Analysis of Variance for weight, thickness, and firmness

Source	df	Weight		Thickness		Firmness	
		MS	P-value	MS	P-value	MS	P-value
Lines	28	730,232	<0.01	181	<0.01	51,895	<0.01
Season	1	7,799,430	<0.01	1,481	<0.01	2,047	0.4
Lines x Season	28	100,558	<0.01	25	<0.01	27,117	<0.01
Error		27,287		6		3,350	

ความหนาเนื้อของฟักทองในฤดูหนาวมีค่าอยู่ในช่วง 7.4 ถึง 22.9 มิลลิเมตร และในฤดูฝนมีค่าอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 30.0 มิลลิเมตร เมื่อทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนด้วยค่า $F_{\max}$ เท่ากับ 2.0 โดยพบว่าความแปรปรวนของความหนาเนื้อในสองฤดูมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยลักษณะความหนาเนื้อได้รับผลจากอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์กับฤดูกาลมีค่า $P < 0.01$ พบว่าฟักทองส่วนใหญ่มีความหนาเนื้อในฤดูฝนมากกว่าฤดูหนาว โดยมีเพียง 7 สายพันธุ์ที่มีความหนาเนื้อไม่แตกต่างกันทางสถิติในสองฤดูกาล ได้แก่ สายพันธุ์ RT1, RT14, RT17, Pach13–2/3, Pach13–3/6,

Paka2 และ KAN1 ลักษณะความหนาเนื้อเป็นไปในทำนองเดียวกับน้ำหนักผล กล่าวคือ ฟักทอง 7 สายพันธุ์ที่น้ำหนักผลไม่แตกต่างกันทางสถิติในสองฤดูกาล พบว่ามีความหนาเนื้อไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อปลูกในสองฤดูกาลเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบฟักทองสายพันธุ์เท่ากับฟักทองพันธุ์การค้า TT และ KT พบว่าสายพันธุ์ฟักทองที่มีความหนาเนื้อมากกว่าพันธุ์การค้าเมื่อปลูกในฤดูหนาว คือ Pach13–2/3, Pach13–3/6, KPS(PW) และ CM1 ซึ่งพันธุ์การค้าทั้ง TT และ KT ที่ปลูกในฤดูฝนมีความหนาเนื้อสูงกว่าฟักทองจากฤดูหนาวเช่นกัน สายพันธุ์ที่มีความหนาเนื้อสูงกว่าพันธุ์การค้าทั้งสองสายพันธุ์ในฤดูกาลนี้

คือ สายพันธุ์แท้ RT4/RT10-3s-3s และ พันธุ์พื้นเมือง CM1 และยังพบว่า มีฟักทองจำนวน 9 สายพันธุ์ ที่มีความหนาเนื้อไม่แตกต่างจากฟักทองพันธุ์การค้า KT แม้ความหนาเนื้อของฟักทองสายพันธุ์เหล่านี้มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบจากการผลิตฟักทองสองฤดูกาล แต่มีฟักทองบางสายพันธุ์ที่มีความหนาเนื้อสูงยังคงแสดงลักษณะดังกล่าวทั้งสองฤดูกาล จึงเห็นได้ว่า หากเลือกสายพันธุ์ฟักทองที่มีความหนาเนื้อสูงจะยังคงให้ลักษณะความหนาเนื้อสูงแม้ปลูกต่างฤดูกาล

ความหนาเนื้อของฟักทองในฤดูหนาวมีค่าอยู่ในช่วง 309.4 ถึง 725.5 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร และในฤดูฝนมีค่าอยู่ในช่วง 315.9 ถึง 613.7 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร เมื่อทดสอบ ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนด้วยค่า $F_{\max}$ เท่ากับ 2.38 พบว่าความแปรปรวนของความลักษณะความหนาเนื้อของฟักทองในสองฤดูกาลไม่แตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบความแปรปรวนต่อลักษณะความหนาเนื้อพบว่าความหนาเนื้อได้รับผลจากอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์กับฤดูกาลมีค่า $P < 0.01$ พบว่ามีฟักทอง 14 สายพันธุ์ที่มีค่าความหนาเนื้อไม่แตกต่างกันทางสถิติในสองฤดูกาล ได้แก่ RT3, RT4, RT7, RT8, RT9, RT10, RT14, RT17, Pach1-2s-3/5, Pach1-2s-4s, Pach13-3/6, Pach14-1s, Paka1 และ KAN1 ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้น มีฟักทอง 13 จาก 14 สายพันธุ์ เป็นสายพันธุ์แท้ที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์มีความหนาเนื้อค่อนข้างคงที่ทั้งสองฤดูกาล ซึ่งต่างจากฟักทองพันธุ์การค้า TT และ KT และพันธุ์พื้นเมือง KPS(PW) และ CM1 ที่พบความแตกต่างของความหนาเนื้อเมื่อปลูกในฤดูกาลที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า สายพันธุ์แท้ 10 สายพันธุ์ มีความหนาเนื้อแตกต่างกันทางสถิติ โดยฟักทองสายพันธุ์แท้ 5 สายพันธุ์ที่ปลูกในฤดูฝนมีความหนาเนื้อสูงกว่าฟักทองจากฤดูหนาว ในขณะที่มีฟักทองอีก 5 สายพันธุ์ที่ปลูกในฤดูฝนมีความหนาเนื้อต่ำกว่าฟักทองจากฤดูหนาว ซึ่งความหนาเนื้อเป็นลักษณะสำคัญในการคัดเลือกฟักทองเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับเนื้อสัมผัสความนุ่มหรือความแข็งของเนื้อฟักทอง (Martínez-Valdivieso *et al.*, 2015) เมื่อเปรียบเทียบความหนาเนื้อระหว่างสายพันธุ์การค้า ได้แก่ KT และ TT ที่มีค่าความหนาเนื้อตามความต้องการของตลาดกับสายพันธุ์แท้พบว่ามี 6 สายพันธุ์ที่มีความหนาเนื้อไม่แตกต่างจากสายพันธุ์การค้า ได้แก่ RT1, RT4, RT10, RT15, RT17 และ Pach13-1s-4s จากการศึกษาครั้งนี้พบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์กับฤดูกาลต่อลักษณะที่ทำการศึกษาดังกล่าว เช่นเดียวกับงานวิจัยในเมล่อนที่เพาะปลูกในปีที่แตกต่างกัน พบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์กับปีที่เพาะปลูกมีผลต่อ

น้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Guimarães *et al.*, 2016) รวมทั้งพบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์กับสถานที่เพาะปลูกต่อน้ำหนักผลผลิตในข้าวโพด (Nzuve *et al.*, 2013) จากการประเมินพบฟักทองที่มีความโดดเด่น 3 สายพันธุ์ ได้แก่ RT14, RT17 และสายพันธุ์พื้นเมือง KAN1 เนื่องจากมีลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความหนาเนื้อไม่แตกต่างกันทางสถิติในสองฤดูกาล จึงเป็นสายพันธุ์ที่สามารถปลูกและให้ผลผลิตได้ดีในทั้งฤดูหนาวและฤดูฝน

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบความแปรปรวนต่อลักษณะที่ปรากฏ แสดงใน Figure 1 พบว่าน้ำหนักผลและความหนาเนื้อได้รับอิทธิพลหลักมาจากฤดูกาล มีค่าเท่ากับร้อยละ 90.1 และ 84.5 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของหน้าของ Kuslu *et al.* (2014) ประเมินปริมาณผลผลิตของฟักทอง (summer squash) เมื่อให้น้ำที่ระดับต่างกัน (300, 400 และ 500 มิลลิเมตร) พบว่าปริมาณผลผลิตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำ โดยสอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้พบว่าในฤดูฝนฟักทองได้รับน้ำในปริมาณมาก ทำให้น้ำหนักผลและความหนาเนื้อมีความมากกว่าในฤดูหนาว ในขณะที่ลักษณะความหนาเนื้อได้รับอิทธิพลหลักมาจากสายพันธุ์ร้อยละ 61.5 และอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาลมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.1 จึงเห็นได้ว่า พันธุกรรมเป็นปัจจัยหลักต่อลักษณะความหนาเนื้อ ส่วนสภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อความหนาเนื้อเพียงร้อยละ 2.4 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bang *et al.* (2004) พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะความหนาเนื้อและคุณภาพผลของแตงโมอาทิ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด และปริมาณสารไลโคปีน ขึ้นอยู่กับปัจจัยของพันธุกรรม มากกว่าปัจจัยของสภาพแวดล้อมหรือปริมาณของน้ำที่ให้น้ำในการเพาะปลูก

จากข้อมูลน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความหนาเนื้อของฟักทองที่เพาะปลูกในสองฤดูกาล สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนการปลูก โดยเพาะปลูกฟักทองในช่วงฤดูฝนเพื่อให้ได้น้ำหนักผลและความหนาเนื้อสูง หรือเลือกเพาะปลูกสายพันธุ์ Pach13-2/3, Pach13-4s และ Paka2 ที่ให้น้ำหนักผลและความหนาเนื้อสูงทั้งสองฤดูกาล รวมทั้งใช้เป็นข้อมูลสำหรับคัดเลือกสายพันธุ์ให้เหมาะสมต่อฤดูกาลที่เพาะปลูกเพื่อให้มีความหนาเนื้อสูง โดยสายพันธุ์ Pach1-7/8, Paka2RT4/RT10-3s, RT4/RT10-5/1, RT4/RT10-3s-3s ควรปลูกในฤดูหนาว ในขณะที่สายพันธุ์ RT1, RT15, Pach1-5s, Pach13-2/3, Pach13-4s, และ Pach13-5/3 ควรปลูกในช่วงฤดูฝนเพื่อให้ได้ความหนาเนื้อสูง

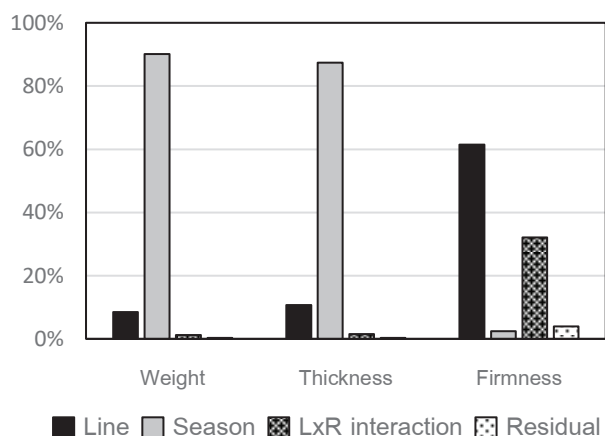


Figure 1 Percent Phenotypic Variance explained

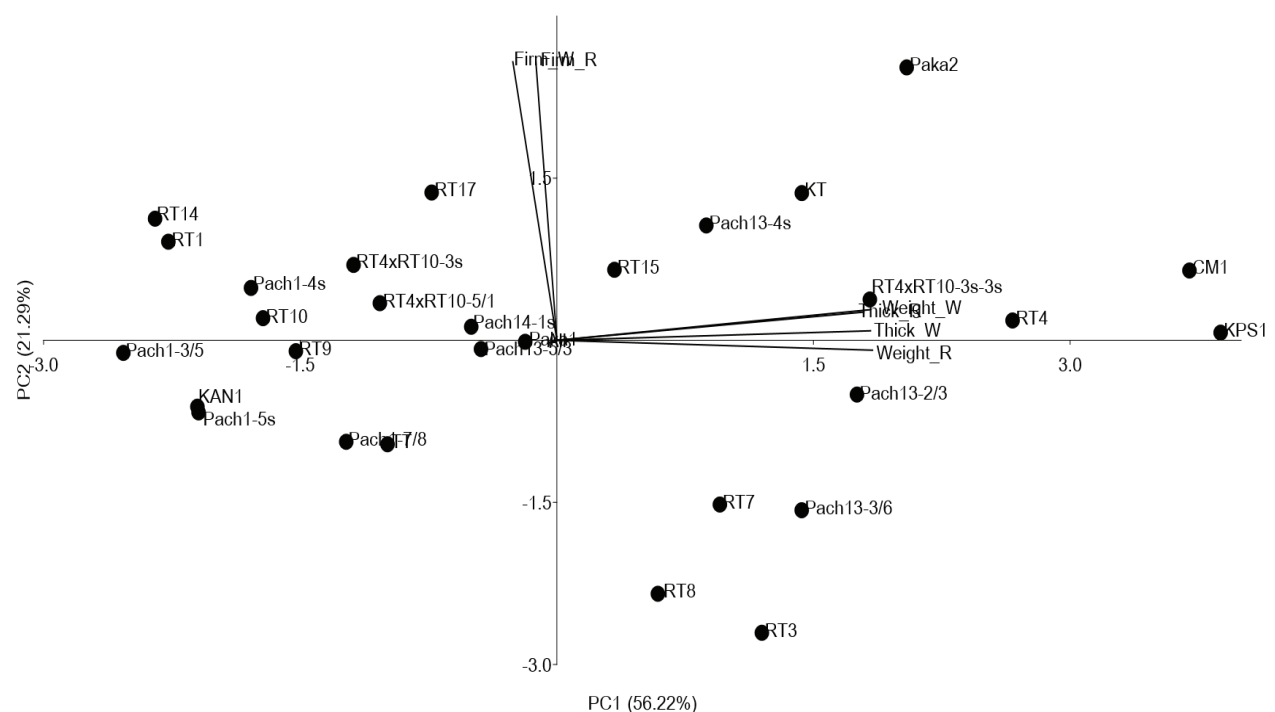
จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อในแต่ละฤดูการ แสดงใน Table 4 พบว่าลักษณะของน้ำหนักผลในสองฤดูการมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันโดยมีค่า r เท่ากับ 0.82 หมายความว่า สายพันธุ์ที่มีน้ำหนักผลสูง เมื่อปลูกในสองฤดูการยังมีน้ำหนักผลในอันดับ (ranking) ที่สูงทั้งสองฤดูการ และความหนาเนื้อในสองฤดูการมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันมีค่า r เท่ากับ 0.78 รวมทั้งพบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผลกับความหนาเนื้อในแต่ละฤดูการมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันโดยมีค่า r เท่ากับ 0.85 และ 0.83 ในฤดูหนาวและฤดูฝน ตามลำดับ ส่วนความแน่นเนื้อไม่พบความสัมพันธ์ในสองฤดูการ ($r = 0.28$) เนื่องจากความแน่นเนื้อได้รับอิทธิพลของพันธุกรรมเป็นหลัก และยังได้รับอิทธิพลระหว่างสายพันธุ์กับฤดูการ (Figure 1) เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) บนพื้นฐานของ correlation matrix แสดงใน Figure 2 สามารถอธิบายความแปรปรวนทั้งหมดได้ร้อยละ 77.51 โดย PC1 และ PC2 อธิบายความแปรปรวนได้เท่ากับร้อยละ 56.22 และ 21.29 ตามลำดับ ใน PC1 แสดงในแกน X ของ Figure 2 บ่งบอกความแปรปรวนของลักษณะน้ำหนักผลและความหนาเนื้อในสองฤดูการ ในส่วนของ PC2 แสดงในแกน Y บ่งบอกความแปรปรวนของลักษณะความแน่นเนื้อในสองฤดูการ จากการวิเคราะห์พบความสัมพันธ์ของลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความแน่นเนื้อในสองฤดูการมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยการวิเคราะห์ PCA แสดงความหลากหลายของสายพันธุ์ฟักทองที่ทำการศึกษานี้ใน Figure 2 และสามารถจำแนกกลุ่มของสายพันธุ์ตามน้ำหนักผลและความหนาเนื้อ

ได้ ดังนี้ ฟักทองที่มีน้ำหนักผลและความหนาเนื้อน้อย ดังในบริเวณ Quadrant ที่ 2 และ 3 (แกนลบของ PC1) จำนวน 16 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ RT1, RT9, RT10, RT14, RT17, Pach1-3/5, Pach1-4s, Pach1-5s, Pach1-7/8, Pach13-5/3, Pach14-1s, Paka1, RT4/RT10-3s, RT4/RT10-5/1, สายพันธุ์การคำ TT และสายพันธุ์พื้นเมือง KAN1 ส่วนสายพันธุ์ที่มีน้ำหนักผลและความหนาเนื้อมาก จำนวน 13 สายพันธุ์กระจายตัวอยู่ใน Quadrant ที่ 1 และ 4 (แกนบวกของ PC1) ได้แก่ สายพันธุ์แท้ Pach13-4s, Pach13-2/3, Pach13-3/6, RT3, RT4, RT7, RT8, RT15, RT4/RT10-3s-3s, Paka2, สายพันธุ์การคำ KT และสายพันธุ์พื้นเมือง CM1 และ KPS1 (PW) รวมทั้งสามารถจำแนกสายพันธุ์ที่มีความแน่นเนื้อสูงและต่ำตามแกน PC2 โดยหากสายพันธุ์อยู่ใน Quadrant ที่ 1 และ 2 (แกนบวกของ PC2) จะมีความแน่นเนื้อสูง ได้แก่ สายพันธุ์ RT1, RT4, RT10, RT14, RT15, RT17, RT4/RT10-3s, RT4/RT10-3s-3s, RT4/RT10-5/1, Pach1-4s, Pach13-4s, Pach14-1s, Paka2, KT, CM1 และ KPS1(PW) ส่วนสายพันธุ์ฟักทองที่ถูกจัดอยู่ในแกนลบของ PC2 จะมีค่าความแน่นเนื้อต่ำมีจำนวน 13 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ RT3, RT7, RT8, RT9, Pach1-3/5, Pach1-5s, Pach1-7/8, Pach13-2/3, Pach13-3/6, Pach13-5/3, Paka1, KAN1 และ TT จากการวิเคราะห์พบว่าสายพันธุ์พื้นเมือง CM1 และ KPS(PW) ซึ่งเป็นพันธุ์พื้นเมืองจากจังหวัดเชียงใหม่และนครปฐมมีการกระจายตัวแยกออกจากสายพันธุ์อื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีน้ำหนักผลและความหนาเนื้อสูงในทั้งสองฤดูการ นอกจากนั้นพบสายพันธุ์แท้ที่มีความโดดเด่นของน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อสูง มีทั้งหมด 5 สายพันธุ์ ได้แก่ RT4, RT15, RT4/RT10-3s-3s, Pach13-4s และ Paka2 แสดงใน Quadrant ที่ 1 และอยู่ในกลุ่มเดียวกับพันธุ์การคำ KT โดยทั้ง 5 สายพันธุ์นี้มีน้ำหนักผลอยู่ใน รหัสที่ 6 (1-1.5 กิโลกรัม) รวมทั้งมีความแน่นเนื้อมากกว่าค่าเฉลี่ยของฟักทองทั้งหมดที่ทำการศึกษา โดยสายพันธุ์ Paka2 มีน้ำหนักผล, ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อสูงแตกต่างจากกลุ่มของสายพันธุ์อื่นที่ทำการศึกษา รวมทั้ง สายพันธุ์ RT4 มีน้ำหนักผลและความหนาเนื้อในสองฤดูการสูงใกล้เคียงกับกลุ่มของสายพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งสามารถคัดเลือกสายพันธุ์ดังกล่าวนี้สำหรับการเป็นพ่อหรือแม่ในการสร้างสายพันธุ์ลูกผสมเพื่อเพิ่มลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อในฟักทองต่อไป

Table 4 Principal Component Analysis (PCA) and correlation coefficients of weight, thickness, and firmness of 29 pumpkin lines in the winter (W) and rainy (S) seasons

PC	Eigenvalue	% variance	Correlation Coefficient				
			Weight_W	Weight_R	Thickness_W	Thickness_R	Firmness_W
1	3.37	56.22	Weight_W				
2	1.28	21.29	Weight_R	0.82**			
3	0.76	12.64	Thickness_W	0.85**	0.73**		
4	0.31	5.18	Thickness_R	0.70**	0.83**	0.78**	
5	0.23	3.88	Firmness_W	-0.03 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	0.02 ^{ns}
6	0.05	0.80	Firmness_R	-0.01 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.04 ^{ns}	-0.06 ^{ns}

ns = non-significantly different, * = significantly different at $P < 0.05$, ** = significantly different at $P < 0.01$

**Figure 2** Principal component analysis base on correlation matrix of 29 pumpkin lines

อย่างไรก็ตามฟักทองสายพันธุ์ส่วนใหญ่มีน้ำหนักและความหนาเนื้อน้อยโดยมีการกระจายตัวอยู่ใน Quadrant ที่ 2 และ 3 โดยน่าจะเกิดจากความถดถอยทางพันธุกรรม (genetic depression) เมื่อมีการผสมตัวเองหลายรุ่นจากการปรับปรุงพันธุ์เพื่อพัฒนาสายพันธุ์แท้ (Cardoso, 2004) รวมทั้งจากการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ก่อนหน้ามีวัตถุประสงค์ในการคัดเลือกเพื่อเพิ่มลักษณะของปริมาณสารเบต้าแคโรทีน (วรศรา แสนมี และคณะ, 2565) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง (รัชชานนท์ ทองแผ่น และคณะ, 2562) โดยไม่ได้คัดเลือกสายพันธุ์ที่มีลักษณะของน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความแน่นเนื้อสูง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษา

ครั้งนี้ สามารถคัดสายพันธุ์ที่มีความแน่นเนื้อสูงได้ เนื่องจากลักษณะดังกล่าวควบคุมด้วยพันธุกรรมเป็นหลัก รวมถึงได้สายพันธุ์แท้ที่ผลขนาดกลางและมีความหนาเนื้อที่ดีเทียบเท่าพันธุ์การค้า สายพันธุ์แท้ที่มีความโดดเด่นของลักษณะน้ำหนักผล ความหนาเนื้อ และความแน่นเนื้อ อาทิ สายพันธุ์ RT4, Pach13-2/3 และ Paka2 สายพันธุ์เหล่านี้สามารถคัดเลือกเพื่อนำไปใช้เป็นพ่อแม่พันธุ์ในการพัฒนาสายพันธุ์ลูกผสม

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ฟักทองสายพันธุ์แท้จากการปรับปรุงพันธุ์มีความหลากหลายของน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความแน่นเนื้อ

จากการประเมินในสองฤดูกาลพบว่า น้ำหนักผลและความหนาเนื้อได้รับอิทธิพลอย่างมากจากฤดูกาล โดยในฤดูฝนมีค่าน้ำหนักผลและความหนาเนื้อมากกว่าฤดูหนาว อย่างไรก็ตามความแน่นเนื้อในฟักทองขึ้นอยู่กับสายพันธุ์เป็นหลักและยังพบอิทธิพลร่วมระหว่างสายพันธุ์และฤดูกาล โดยในการศึกษานี้มีฟักทอง 3 สายพันธุ์ที่มีลักษณะที่ประเมินไม่แตกต่างกันในทั้งสองฤดูกาล ได้แก่ RT14 RT17 และ KAN1 จากการวิเคราะห์ Principle component analysis สามารถจำแนกสายพันธุ์ฟักทองที่ผลมีน้ำหนักมาก ความหนาเนื้อสูงและความแน่นเนื้อสูงได้ รวมทั้งสามารถคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีความโดดเด่นของน้ำหนักผล ความหนาเนื้อและความแน่นเนื้อได้แก่ สายพันธุ์ RT4, RT15, RT4/RT10-3s-3s, Pach13-4s และ Paka2 ซึ่งสามารถใช้สำหรับการพัฒนาฟักทองสายพันธุ์ลูกผสมที่มีปริมาณผลผลิตและความแน่นเนื้อสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ FF (KU) 1.64 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยและภาควิชาชีพสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับสถานที่ รวมทั้งอุปกรณ์สำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2566, 20 ธันวาคม). รายงานข้อมูลภาวะการผลิตพืชอายุสั้น ชนิดฟักทองทั่วประเทศ. <http://production.doae.go.th/>

รัชชานนท์ ทองแผ่น, วรลักษณ์ ประยูรมหิศร และ อัญมณี อาวุชานนท์. (2562). การประเมินและคัดเลือกสายพันธุ์ฟักทองเพื่อพัฒนาฟักทองสายพันธุ์แท้ที่มีสารเบต้าแคโรทีนสูง. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 37(4), 619–626.

วิศรา แสนมี, ณัฐกร สกุลเพ็ชร, รัชชานนท์ ทองแผ่น และ อัญมณี อาวุชานนท์. (2565). การประเมินคุณภาพผลและสารเบต้าแคโรทีนในประชากรฟักทอง F3–Pach และ P4–Paka ที่พัฒนามาจากฟักทองพันธุ์พื้นเมือง. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ*, 5(2), 38–47.

สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐม. (2566). ข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาการเกษตร 2565–2566. กรมอุตุนิยมวิทยา.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (มกอช.). (2555). มาตรฐานสินค้าเกษตรฟักทอง. <https://www.acfs.go.th/standard/download/PUMPKIN.pdf>

อัญมณี อาวุชานนท์ และปณาลี ภูวกรกุลชัย. (2559). การประเมินความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของฟักทองไทย 29 สายพันธุ์ด้วยเครื่องหมายดีเอ็นเอ AFLP. *วารสารแก่นเกษตร*, 44(2), 237–246.

Aragão, F. A. S. D., Nunes, G. H. D. S., & Queiróz, M. A. D. (2015). Genotype x environment interaction of melon families based on fruit quality traits. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 15, 79–86.

Bang, H., Daniel, I. L., David A. B. & Kevin, C. (2004). Deficit irrigation impact on lycopene, soluble solids, firmness and yield of diploid and triploid watermelon in three distinct environments. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79(6), 885–890.

Cardoso A. I. I. (2004). Depression by inbreeding after four successive self-pollination squash generations. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*, 61(2), 224–227.

Guimarães, I. P., Dovalle, J. C., Antônio, R. P., Aragão, F. A. S. D., & Nunes, G. H. D. S. (2016). Interference of genotype by environment interaction in the selection of inbred lines of yellow melon in an agricultural center in Mossoró-Assu, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(1), 51–59.

Hartley, H. O. (1950). The Maximum F–Ratio as a Short–Cut Test for Heterogeneity of Variance. *Biometrika*, 37, 308–312.

Kumar, V., Mishra, D. P., Yadav, G. C., Singh, D. K., & Tiwari, A. (2022). Genotype× environment interaction and stability analysis for yield and biochemical traits in pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch. ex Poir.). *Vegetable Science*, 49(2), 145–155.

Kuslu, Y., Sahin, U., Kiziloglu, F. M., & Memis, S. (2014). Fruit Yield and Quality, and Irrigation Water Use Efficiency of Summer Squash Drip–Irrigated with Different Irrigation Quantities in a Semi–Arid Agricultural Area. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(11), 2518–2526.

Martínez–Valdivieso, D., Pedro, G., Rafael, F., Angeles, A. M., & Mercedes, D. R. C. (2015). Physical and chemical characterization in fruit from 22 summer squash (*Cucurbita pepo* L.) cultivars. *LWT–Food Science and Technology*, 64, 1225–1233.

- Nzuve, F., Githiri, S., Mukunya, D. M., & Gethi, J. (2013). Analysis of genotype x environment interaction for grain yield in maize hybrids. *Journal of Agricultural Science*, 5(11), 78–85.
- Oloyede, F., & Adebooye, O. C. (2013). Effect of planting date on the yield and proximate composition of pumpkin (*Cucurbita pepo* Linn.) fruit. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(1), 174-181.
- Zhou T., Q. Kong, J., Huang. R., Dai, & Quanhong, L. (2007). Characterization of nutritional components and utilization of pumpkin. *Food*, 1(2), 313–321.

ผลของการเติมกากน้ำตาลและปุ๋ยฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ

Effects of adding molasses and phosphorus fertilizer to thai dessert factory wastewater for biogas production through anaerobic digestion system

ณภัทร งามสิริเกียรติ¹, นพวรรณ เสมวิมล^{1,2,*}, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร^{1,2}, อรอนงค์ ผิวนิล^{1,2}, มัลลิกา ศรีชมภู², จุลบุตร จันทรสุรีย์², นิรุต อุปันนท์² และ ปาวิน วิจิตรตระการ²

Napat Ngamsirikiata, Noppawan Semvimola, Thanit Pattamapitoona, Onanong Phewnila, Manlika Srichomphu, Chulabut Chanthasoon, Nirut Uppanuntb and Pavin Wichittrakarn

Received: 25 July 2024 ; Revised: 16 September 2024 ; Accepted: 21 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของการเติมกากน้ำตาลและปุ๋ยฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย เพื่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก วางแผนการวิจัยเป็น 3 ชุดการทดลองดังนี้ TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียว TR2 น้ำเสียและกากน้ำตาล และ TR3 น้ำเสีย กากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียโดยมีพารามิเตอร์วิเคราะห์ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีโอดี และปริมาณของแข็ง รวมถึงองค์ประกอบธาตุอาหารทั้งหมดในรูปของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทุกๆ 3 วัน ตวงวัดปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทุกวันและเก็บรวบรวมตัวอย่างในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซสูญญากาศ (Glass vial) แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง TR1 และ TR2 เท่ากับ 226.67 ± 15.07 และ 258.67 ± 23.71 มิลลิลิตร ตามลำดับ และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.56 และ 0.61 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลอง TR3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมน้อยที่สุด เท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.53 L CH₄/g VS_{added} สำหรับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป COD พบว่าชุดการทดลอง TR2 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.54 รองลงมาคือ ชุดการทดลอง TR1 (79.99%) และ TR3 (76.36%) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงอัตราส่วนธาตุอาหารด้วยการเติมกากน้ำตาลในระบบไม่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพแต่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบไร้อากาศ ในขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นจากการเติมปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกต่อไป

คำสำคัญ: การย่อยสลายแบบไร้อากาศ, ก๊าซชีวภาพ, น้ำเสีย, โรงงานผลิตขนมไทย, ธาตุอาหาร

Abstract

This research aimed to study the effects of adding molasses and phosphorus fertilizer to Thai dessert factory wastewater to enhance biogas production as an alternative energy source for utilization. The experimental design consisted of three sets: TR1 (wastewater only), TR2 (wastewater and molasses), and TR3 (wastewater, molasses, and phosphorus liquid fertilizer). The experiment was conducted over a period of 30 days. The characteristics of the wastewater, including pH, chemical oxygen demand (COD), suspended solids (SS), and total nutrient content in terms of nitrogen and phosphorus, were analyzed every three days. Biogas production was collected and measured in

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

² โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ

¹ Department of Environmental science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

² The King's Royally Initiated Leam Phak Bia Environment Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok, Thailand.

* Corresponding author: Email: Noppawan.sem@ku.th

glass vials, and its composition was analyzed using GC chromatography. The results indicated that the accumulated biogas volumes for the experimental sets TR1 and TR2 were 226.67 ± 15.07 and 258.67 ± 23.71 mL, respectively, with methane production potentials of 0.56 and 0.61 L CH₄/g VSadded, respectively. The two treatments showed no significant difference ($p>0.05$). In contrast, the experimental set TR3 showed the lowest accumulated biogas volume at 133.67 ± 20.36 mL and a methane production potential of 0.53 L CH₄/g VSadded. For the efficiency of organic matter removal in terms of COD, the experimental set TR2 exhibited the highest treatment efficiency, with a value of 81.54%. This was followed by experimental set TR1 (79.99%) and TR3 (76.36%). Thus, the adjustment of the nutrient ratio by adding molasses in the system did not significantly affect biogas production but did improve the wastewater treatment efficiency of the anaerobic system. However, the increased phosphorus concentration from phosphorus liquid fertilizer inhibited methanogenic bacteria activity, resulting in reduced biogas production efficiency. The results of this study can be applied to develop a biogas production system through an anaerobic digestion process as an alternative energy source for wastewater treatment.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, wastewater, Thai dessert factory, nutrients

บทนำ

กระบวนการผลิตขนมไทยมีการใช้น้ำในหลายขั้นตอนการผลิต ได้แก่ การล้างวัตถุดิบ การเตรียมวัตถุดิบประเภทแป้ง ถั่ว และน้ำตาล การประกอบอาหารโดยการนึ่งและการต้ม และการล้างอุปกรณ์ เป็นต้น โดยน้ำหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตจะมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่สูงมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศลดลง ทำให้เมื่อมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำและก่อให้เกิดปัญหาหมกหมวนต่อสิ่งแวดล้อม (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2560) ดังนั้นแนวทางในการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นวิธีการที่สามารถจัดการน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน อีกทั้งยังเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Bennich & Belyazid, 2017)

การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นหนึ่งในแนวทางการจัดการน้ำเสียที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วยลดปัญหาหมกหมวนในแหล่งน้ำที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งของกิจกรรมมนุษย์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Tetteh & Rathilal, 2021) ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดและกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซชีวภาพในขั้นตอนสุดท้าย (Raja & Wazir, 2017) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ควรมีก๊าซมีเทน (CH₄) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 50-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณร้อยละ 30-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และแอมโมเนีย (NH₃) ปริมาณเล็กน้อยเป็นต้น (Ahmmad & Haque, 2014)

ทั้งนี้ปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับอิทธิพลจากหลายปัจจัย โดยหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ คือ ปริมาณธาตุอาหารซึ่งแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศควรมีปริมาณธาตุอาหารในรูปของอัตราส่วน COD:N:P อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 100:2.2:0.4 (กรมพลังงานทดแทน, 2542) แต่เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่มีอัตราส่วนธาตุอาหารต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (ณภัทร งามศิริเกียรติ และคณะ, 2567) ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) มาประยุกต์ใช้ในการปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารด้วยการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส โดยมีงานวิจัยของ Kalembe and Barbusinski (2017) พบว่ากากน้ำตาลสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึงร้อยละ 21 เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการหมักร่วมกับกากน้ำตาล ในขณะที่ปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสถือเป็นวัสดุหมักร่วมที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสสูงและมีไนโตรเจนต่ำ (Seachem, 2022) จึงทำให้ง่ายต่อการควบคุมอัตราธาตุอาหารสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ (กลั่นประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2564; จินตนา ทองเอี้ยว และคณะ, 2558; เอนก สวาทอินทรีย์ และคณะ, 2565)

งานวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยและผลของการปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารในน้ำเสีย เพื่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำจากการหมักแบบไม่ใช้อากาศ รวมถึงปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซ เพื่อใช้เป็นแนวทางพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. ตัวอย่างน้ำเสียและวัสดุหมักร่วม

ตัวอย่างน้ำเสียสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตขนมไทยทรัพย์สินกุล จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีกระบวนการผลิตขนมไทยหลายชนิด เช่น ทองหยิบ ทองหยอด ฝอยทอง และหม้อแกง เป็นต้น ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อรวบรวมน้ำเสียที่รวบรวมน้ำเสียหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตก่อนส่งเข้าสู่ระบบบำบัด

วัสดุหมักร่วมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 (Molasses) เพื่อให้ช่วยต่อการผสมและย่อยสลาย และปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสเจือจางร้อยละ 1 (Flourish Phosphorus) เนื่องจากเป็นวัสดุหมักราคาประหยัดและหาง่าย รวมถึงมีธาตุอาหารสูงและง่ายต่อการควบคุมอัตราส่วนธาตุอาหารของวัสดุหมัก

2. ถึงปฏิกรณ์สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ดำเนินการวิจัยโดยใช้ชุดอุปกรณ์การผลิตก๊าซชีวภาพดัดแปลงจากวิธีการของ Kanu *et al.* (2015) ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย ขวดแก้วสีชาขนาด 2.5 ลิตร ปิดปากขวดด้วยจุกยางเจาะรู 2 รู สำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์และแท่งแก้วที่ต่อเข้ากับสายซิลิโคนสำหรับเป็นทางไหลของก๊าซเข้าสู่ถุงเก็บก๊าซ (Gas sampling bag) ปริมาตร 0.5 ลิตร (Figure 1a) และชุดอุปกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียประกอบด้วย ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และวาล์วกันอากาศไหลย้อนกลับ (Figure 1b) ปิดรอยรั่วระหว่างข้อต่อด้วยการรื้อนและใช้กระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ปิดขวดสำหรับจำลองระบบภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้อากาศในระบบปิด

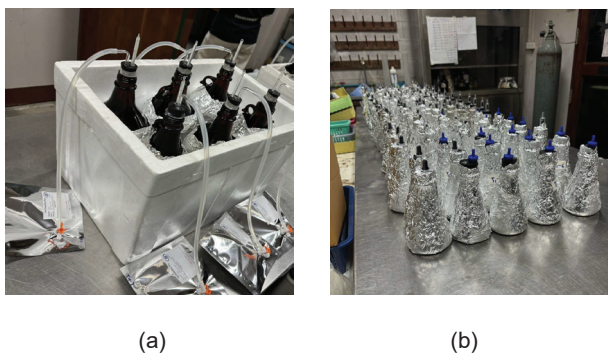


Figure 1 Set of equipment (a) biogas production
(b) wastewater treatment

การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ

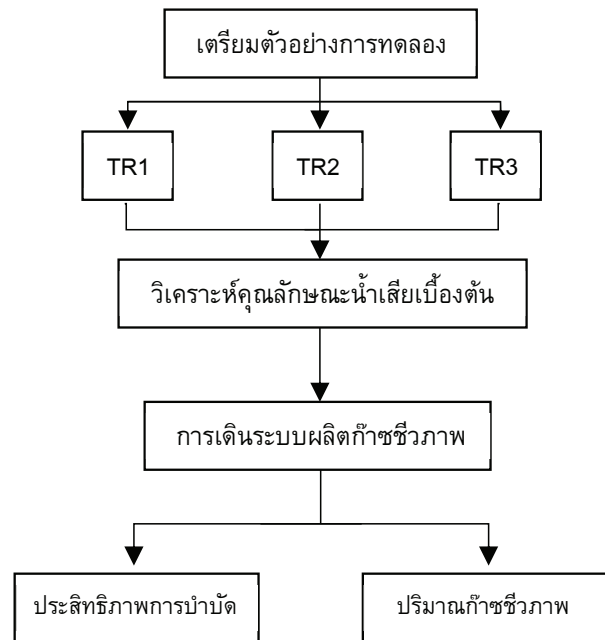


Figure 2 The conceptual biogas production Framework

กำหนดชุดการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดการทดลอง TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียว เป็นชุดควบคุม ชุดการทดลอง TR2 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ 50:1 และชุดการทดลอง TR3 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 ต่อปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสเจือจางร้อยละ 1 เท่ากับ 50:1:0.5 ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียเบื้องต้น โดยมีพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์แสดงดัง Table 1 ตามวิธีการมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ (APHA *et al.*, 2012) และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เริ่มเดินระบบในรูปแบบการป้อนอาหารแบบกะ (batch) ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส) แล้วทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 30 วัน โดย 1 ชุดการทดลองจะประกอบด้วยแบบจำลองถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำนวน 3 ชุด และถึงปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียจำนวน 10 ชุด ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดย 1 ชุดการทดลอง เป็นตัวแทนระยะเวลาบำบัด 3 วัน

Table 1 Water quality parameters, units and analytical methods

Parameters	Units	Analytical Method
pH	-	pH Meter
COD	mg/l	Close Reflux Method
TS	mg/l	Gravimetric Method
VS	mg/l	Gravimetric Method
TKN	mg/l	Kjeldahl Method
Nitrate	mg/l	Brucine Method
TP	mg/l	Ascorbic acid

ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทุกๆ 3 วัน โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) เพื่อดูแนวโน้มและความสัมพันธ์ของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดกับผลผลิตปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น รวมถึงระยะเวลาเก็บที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาคำนวนหาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ วิธีการคำนวณแสดงดัง สมการที่ 1

$$\% \text{ Removal} = \frac{\text{influent} - \text{Effluent}}{\text{influent}} \times 100 \quad (1)$$

นอกจากนี้ดำเนินการเก็บตัวอย่างก๊าซจากถังเก็บก๊าซที่ต่อเชื่อมกับชุดอุปกรณ์การผลิตก๊าซชีวภาพทุกวันโดยใช้หลอดเก็บก๊าซ (Gas tight syringe) ดูดตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังเก็บก๊าซที่มีวาล์วเปิดปิดการไหลของก๊าซจนถังเก็บก๊าซเป็นสุญญากาศ และปล่อยในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซสุญญากาศ (Glass vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร จดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันและนำตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (CH_4) โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography- mass spectrometry (GC/MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 5975) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพตามวิธีของ Nielfa *et al.* (2015) แบบจำลองศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\text{BMP}_{\text{thCOD}}$) แสดงดังสมการที่ 2 สำหรับพิจารณาถึงแนวทางการใช้ประโยชน์ต่อไป

$$\text{BMP}_{\text{thCOD}} = \frac{n_{\text{methane}} \times R \times T}{P \times \text{VS}_{\text{added}}} \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } n_{\text{methane}} = \frac{\text{COD}}{64 \text{ (g/mol)}} \quad (3)$$

$\text{BMP}_{\text{thCOD}}$ คือ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\text{L CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$)

n_{methane} คือ จำนวนโมเลกุลของมีเทน (mol)

R คือ ค่าคงตัว (0.082 atm L/mol K)

T คือ ที่อุณหภูมิ 35°C (308 K)

P คือ ที่ความดันปกติ (1 atm)

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. คุณลักษณะของวัสดุหมัก

น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะทางกายภาพ คือ มีสีน้ำตาลอมเหลือง มีตะกอนแขวนลอยปริมาณมาก ซึ่งเป็นตะกอนสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการผลิตขนมไทย และมีกลิ่นเปรี้ยวจากน้ำหมักชีวภาพที่ใช้ในการผสมน้ำล้างพื้นเพื่อทำความสะอาด ส่งผลให้น้ำเสียตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์สูงและมีสภาพเป็นกรด จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียในชุดการทดลอง TR1 เป็นชุดควบคุม เทียบกับคุณลักษณะน้ำเสียที่ใช้วิธีการหมักร่วมเพื่อปรับอัตราส่วนธาตุอาหารในชุดการทดลอง TR2 และ TR3 พบว่าชุดการทดลอง TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียวมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 5.69 มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) เท่ากับ 5,333.33 ± 923.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 95.84 สำหรับคุณภาพน้ำเสียที่ใช้วิธีการหมักร่วมในชุดการทดลอง TR2 และ TR3 มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเล็กน้อย เท่ากับ 5.55 และ 5.43 ตาม

ลำดับ แต่มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีเพิ่มขึ้น (COD) เท่ากับ $6,933.33 \pm 461.88$ และ $5,866 \pm 461.88$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ รวมทั้งค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 86.06 และ 84.50 ตามลำดับ โดยจาก Table 2 พบว่าอัตราส่วนธาตุอาหารในรูปของ COD:N:P ของทั้ง 3 ชุดการทดลองมีปริมาณธาตุอาหารที่

จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายของกลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศ โดยเฉพาะฟอสฟอรัสมีปริมาณค่อนข้างต่ำ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารที่กลุ่มแบคทีเรียใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศควรมีอัตราส่วนในรูป COD:N:P อย่างน้อยเท่ากับ 100:2.2:0.4 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2564)

Table 2 Characteristics of substrate and co-digestion

Parameter	Experimental		
	TR1	TR2	TR3
pH*	5.69 ± 0.03 a	5.55 ± 0.01 b	5.43 ± 0.02 c
COD (mg/l)*	$5,333.33 \pm 923.76$ b	$6,933.33 \pm 461.88$ a	$5,866.67 \pm 461.88$ ab
TS (mg/l)*	$4,116.85 \pm 53.40$ c	$5,193.67 \pm 108.09$ a	$4,922.19 \pm 110.51$ b
VS (mg/l)*	$3,945.67 \pm 72.14$ c	$4,469.67 \pm 109.43$ a	$4,159.40 \pm 119.75$ b
TN (mg/l)*	87.80 ± 5.56 c	156.98 ± 7.82 a	111.88 ± 5.30 b
TP (mg/l)*	10.15 ± 2.65 c	12.92 ± 1.28 b	19.70 ± 2.10 a
COD:N:P	100:1.73:0.20	100:2.18:0.18	100:2.00:0.34

* Different with letters (a-c) in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

2. ผลผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการทดลองการหมักน้ำเสียโรงงานขนมไทยทั้ง 3 ชุดการทดลองในระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาในการทดลอง 30 วัน จาก Figure 3 แสดงให้เห็นว่าทุกชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซสะสมเกิดขึ้น โดยชุดการทดลอง TR2 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลมีปริมาณก๊าซสะสมสูงสุด รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 ชุดควบคุม เท่ากับ 258.67 ± 23.71 และ 226.67 ± 15.07 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's multiple range test พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลอง TR 3 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลต่อปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสมีผลผลิตปริมาณก๊าซสะสมน้อยสุดเท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จาก Figure 4 พบว่า ทุกชุดการทดลองมีอัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงวันที่ 3 ก่อนที่ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในวันที่ 15 เป็นต้นไป โดยชุดการทดลอง TR1, TR2 และ TR3 มีอัตราการผลิตก๊าซที่สภาวะคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 5.05 ± 0.49 , 6.72 ± 3.99 และ 2.45 ± 1.89 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่มากและย่อยสลายง่ายสำหรับให้กลุ่มแบคทีเรียใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ ทำให้เกิดการย่อยสลาย

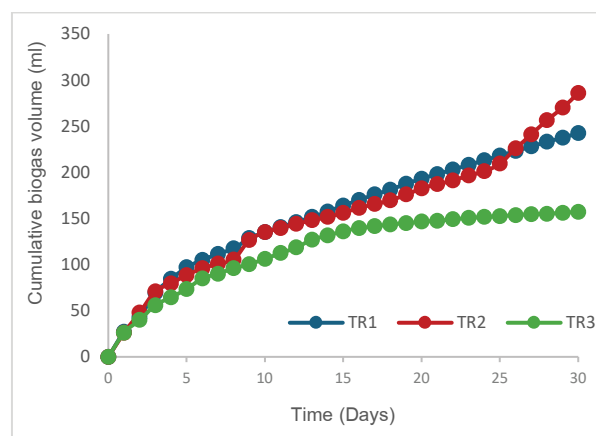


Figure 3 Cumulative biogas production in anaerobic reactor

สารอินทรีย์และเกิดก๊าซขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ในช่วงหลังจากนั้นจะเหลือปริมาณสารอินทรีย์อยู่น้อยและย่อยสลายยาก จึงทำให้เกิดการผลิตก๊าซลดน้อยลง (Zhang et al., 2014) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Konkol et al. (2018) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียของโรงงานผลิตเบเกอรี่ซึ่งมีการใช้วัตถุดิบประเภทแป้งเช่นเดียวกับกระบวนการผลิตขนมไทย ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 55 วัน พบว่าระบบย่อยหมักแบบไม่ใช้อากาศจะเริ่มเข้าสู่สภาวะการผลิตก๊าซเริ่มลดลงและคงที่ในช่วงวันที่ 15-16 ของการทดลอง

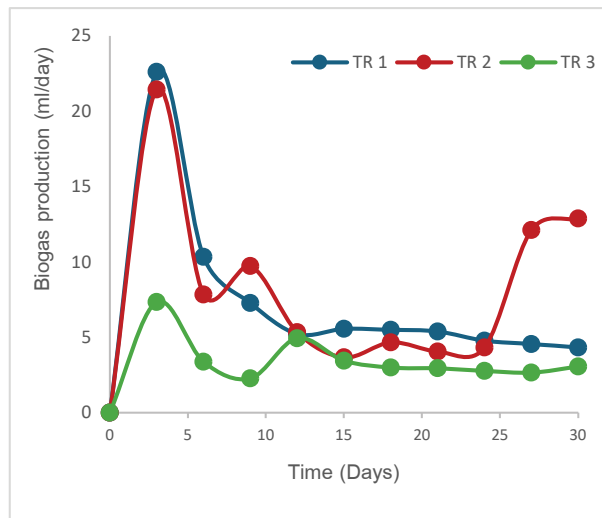


Figure 4 Biogas production rate from Thai dessert factory wastewater

ทั้งนี้เห็นได้ว่าปริมาณผลผลิตก๊าซสะสมช่วง 25 วันแรกของการทดลอง TR1 สูงกว่าชุดการทดลอง TR2 และ TR3 เท่ากับ 204.67 ± 38.00 , 191.67 ± 36.06 และ 129 ± 24.74 มิลลิลิตร ตามลำดับ ในขณะที่หลังวันที่ 25 ชุดการทดลอง TR2 มีอัตราผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากชุดการทดลอง TR2 และ TR3 มีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยส่งเสริมกิจกรรมการทำงานของแบคทีเรียภายในระบบแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Fernández *et al.*, 2005) โดยองค์ประกอบหลักของกากน้ำตาลประกอบไปด้วยน้ำตาลซูโครส (Sucrose) ซึ่งเป็นสารชีวโมเลกุล จึงทำให้แบคทีเรียย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในการย่อยสลายได้ทันที (บุญช่วย ปานอินทร์, 2558) ดังนั้นจึงต้องใช้ระยะเวลานานขึ้นในการย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อนนำมาใช้ในระบบการย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพ (Emberlin *et al.*, 2018) จึงเป็นสาเหตุทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายการทดลอง ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง 3 ส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Mancipe-Jiménez *et al.* (2017) ที่ได้ศึกษาผลของปริมาณฟอสฟอรัสต่อระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ภายในระบบมีสภาพความเป็นกรดมากและนานขึ้น มีผลทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์สร้างกรด จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความสกปรกในรูปค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และอัตราผลิตก๊าซชีวภาพลดลงถึงร้อยละ 20 และ 18 ตามลำดับ

3. ผลของความเป็นกรดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 30 วัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการย่อยสลายชุดการทดลองที่ TR1 และ TR2 มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอยู่ในช่วง 4.15 - 4.76 และปรับตัวเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงท้ายการทดลอง ในขณะที่ในชุดการทดลอง TR3 พบว่าในระหว่างเดินระบบค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงถึง 3.49 และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายเพียงเล็กน้อย แสดงดัง Figure 5 เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมในระบบมากเกินไป ทำให้ระบบมีสภาวะเป็นกรด โดยการดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) เมื่อถูกนำมาใช้ในระบบผลิตก๊าซมีเทนจะส่งผลให้ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างปรับตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Song *et al.*, 2014) แสดงให้เห็นว่าระบบมีการรักษาเสถียรภาพจากกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน จึงทำให้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายลดลงและระบบไม่ถูกยับยั้งการทำงานจากสภาวะกรดภายในระบบ (Sun *et al.*, 2020) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมากเกินไปจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Methanogens) มีประสิทธิภาพลดลง (Shyan *et al.*, 2023) สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพและอัตราผลิตก๊าซชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น (Figure 2, 3) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Ail *et al.*, 2019; Mao *et al.*, 2017) เนื่องจากอาจส่งผลให้กลุ่มแบคทีเรียผลิตก๊าซชีวภาพถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและมีจำนวนเซลล์ลดลง ส่งผลต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Bahira *et al.*, 2018) ในขณะที่การศึกษาของ Ali *et al.* (2019) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุหมักที่มีค่าความเป็นกรดต่ำเริ่มต้นเท่ากับ 3.5 และ 4.5 เป็นระยะเวลา 163 วัน โดยทั้งสองชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น และเมื่อทำการตรวจสอบทางด้านอนุพันธศาสตร์พบว่าแบคทีเรีย *Methanothrix soehngenii* มีความหนาแน่นของประชากรถึงร้อยละ 96.3 และ 86.75 ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีความทนทานต่อสภาวะกรด โดยเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักภายในระบบที่เพียงพอจะทำให้กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถปรับตัวต่อสภาวะกรดและดำเนินกิจกรรมต่อไป

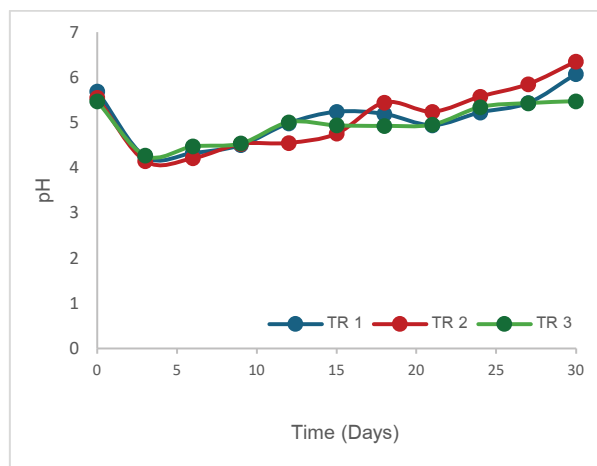


Figure 5 pH results for all the substrates and co-digestion

4. ประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ที่ระยะเวลา 30 วัน แสดงดัง Table 3 พบว่าชุดการทดลอง TR2 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.54, 35.90 และ 47.75 ตามลำดับ รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.99, 20.60 และ

43.22 และชุดการทดลอง TR3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 76.36, 34.79 และ 50.43 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้กล่าวมาข้างต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Santos *et al.* (2022) พบว่าปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ลดลง เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพโดยกลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกาศ ดังนั้นการคำนวณประสิทธิภาพบำบัดของระบบจึงทำให้สามารถช่วยอธิบายและติดตามกระบวนการย่อยสลายของระบบได้ และเมื่อพิจารณาจากค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ที่ลดลงตลอดการทดลอง แสดงดัง Figure 6 พบว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราผลิตก๊าซชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น โดยชุดการทดลอง TR1, TR2 และ TR3 มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะคงที่ (วันที่ 15-30) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74.80 ± 3.34 , 79.08 ± 2.33 และ 69.45 ± 5.66 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับงานวิจัยของจินตนา ทองเอี้ยว และคณะ (2558) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวานหลังจากการหมักเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่าระบบหมักแบบไม่ใช้ออกาศมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.8

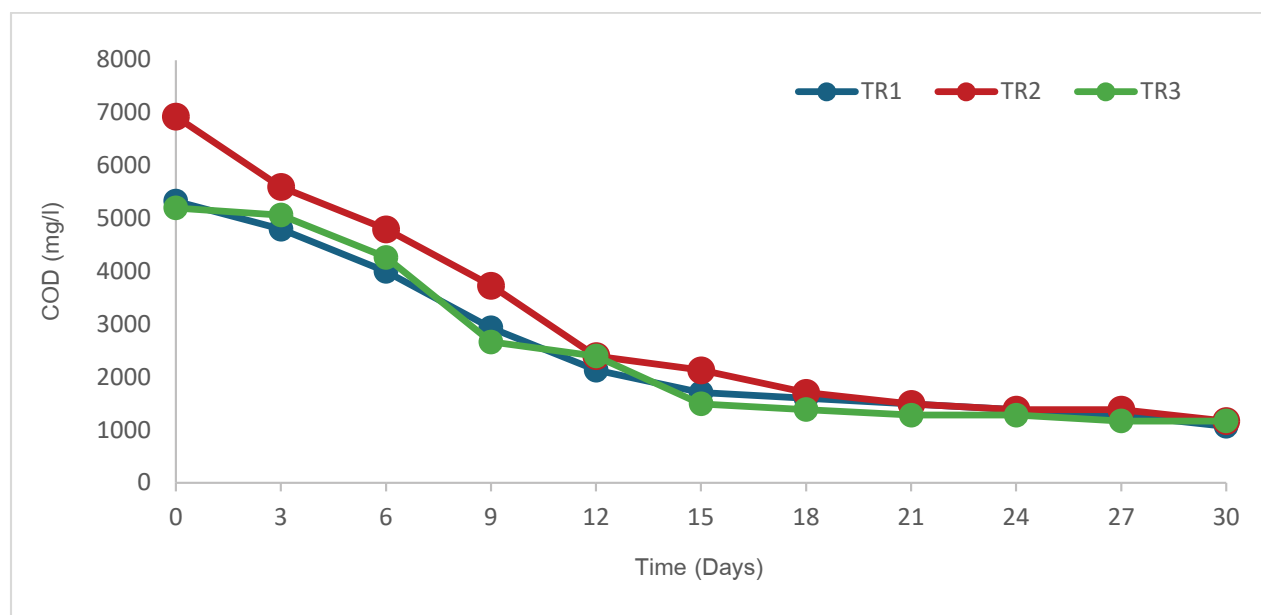


Figure 6 COD results for all the substrates and co-digestion

Table 3 Characteristics of influent in feed tank and effluent from anaerobic reactor

Parameters		TR1	TR2	TR3
pH*	Influent*	5.69 ± 0.03 a	5.55 ± 0.01 b	5.43 ± 0.02 c
	Effluent*	6.07 ± 0.03 a	6.35 ± 0.15 a	5.24 ± 0.20 b
% Removal		-	-	-
COD (mg/l)	Influent*	5,333.33 ± 923.76 b	6,933.33 ± 461.88 a	5,866.67 ± 461.88 ab
	Effluent	1,067 ± 184.75	1,280 ± 184.75	1,387 ± 92.38
% Removal		79.99	81.54	76.36
TS (mg/l)	Influent	4,116.85 ± 53.40 c	5,193.67 ± 108.09 a	4,922.19 ± 110.51 b
	Effluent*	3,268.86 ± 169.71 ab	3,328.89 ± 61.67 ab	3,136.67 ± 175.34 b
% Removal		20.60	35.90	34.79
VS (mg/l)	Influent*	3,945.67 ± 72.14 c	4,469.67 ± 109.43 a	4,159.40 ± 119.75 b
	Effluent	2,240.25 ± 175.64	2,335.56 ± 46.71	2,014.11 ± 155.07
% Removal		43.22	47.75	50.43

* Different with letters (a-c) in the same column indicate significant differences (p < 0.05)

5. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันและการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) พบว่าทุกชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น แต่ก๊าซชีวภาพที่ได้จากทุกชุดการทดลองมีองค์ประกอบร้อยละก๊าซมีเทนน้อยมากประมาณ 20 ppm ตลอดจนการทดลองหรือเกือบเทียบเท่ากับมีเทนในชั้นบรรยากาศ 1.5 ppm (Ehhalt, 1967) ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นกรดในระบบที่ไม่ได้รับการควบคุมจึงมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทน (Atasoy *et al.*, 2019) ประกอบกับอาจเกิดการรั่วไหลออกของก๊าซในระหว่างที่เก็บตัวอย่างจึงทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Singharat *et al.* (2017) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเบเกอรี่โดยก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 46.4-60.8 และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.481 L CH₄/g VS_{removed} ซึ่งใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Ziemiński and Kowalska-Wentel (2015) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากหัวผักกาดหวานหมักร่วมกับน้ำกากส่า ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 62 และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.598 L CH₄/g VS_{removed} ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงใช้การคำนวณค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน โดยคำนวณจากปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) เปรียบเทียบกับปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ตั้งต้นของวัสดุหมัก (BMP_{thCOD}) ดังสมการที่ 2 พบว่า ชุดการทดลอง TR2

มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.61 L CH₄/g VS_{added} รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 และชุดการทดลอง TR3 เท่ากับ 0.56 และ 0.53 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carucci *et al.* (2005) ที่พบว่าการใช้วิธีการหมักร่วม (Co-digestion) จะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการหมักวัตถุดิบอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยด้วยวิธีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส พบว่าชุดการทดลอง TR2 และ TR3 ที่มีการหมักกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส สามารถช่วยปรับปรุงสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหาร โดยการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของซีโอดี ส่งผลทำให้ชุดการทดลอง TR 2 มีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.61 L CH₄/g VS_{added} โดยหลังการหมักเป็นระยะเวลา 30 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 258.67 ± 23.71 มิลลิลิตร รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 ที่มีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.56 L CH₄/g VS_{added} และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 226.67 ± 15.07 มิลลิลิตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีปริมาณธาตุอาหารเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกากน้ำตาลนั้นคือสารชีวโมเลกุลซึ่งย่อยสลายได้ยากและใช้เวลานาน จึงทำให้

ช่วงหลังวันที่ 25 ของการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง TR2 เพิ่มขึ้นในขณะที่ TR1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่ โดยในชุดการทดลองที่มีการหมักร่วมกับปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส TR3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมน้อยสุดเท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร และมีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $0.53 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$ ^{added} เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสมีผลทำให้ภายในระบบมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้กลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตช้าและส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการหมักร่วมกับปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส

ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเพิ่มระยะเวลาเก็บกากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นสารชีวโมเลกุลคู่ รวมถึงการปรับตัวของกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนต่อสภาวะกรดภายในระบบ เพื่อการพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2564). *ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ* (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กลั่นประทุม ปัญญาปิง, รสสุคนธ์ จະวะนะ, ขนิษฐา ราชบังเหิง, ธิติรัตน์ พิสิฐชัยกร, & ชีรเมธ นาประัง. (2564). การอัดก๊าซชีวภาพในถังบรรจุก๊าซและการใช้หุงต้ม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 6(1), 12–17.

จินตนา ทองเอี้ยว, บุญญฤทธิ์ เผ่าเพ็ง, & พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์. (2558). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวาน. ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8* (น. 99–102). สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

ณภัทร งามศิริเกียรติ, นพวรรณ เสมิมูล, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, จุลบุตร จันท์สุริย์, นิรุติ อุปนันท์, & ภาวิน วิจิตรตระการ. (2567). คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย จังหวัดเพชรบุรี ที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ. ใน *การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62* (น. 372–379). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญช่วย ปานอินทร์. (2558). *การศึกษาความเหมาะสมในการใช้น้ำตาลทรายดิบเพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตเอทานอล* [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2560). *คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน*. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

เอนก สาระอินทร์, ฉานิกา แซ่แง, ชุกกลั่น, ชุตินุช สุจริต, & สมรักษ์ รอดเจริญ. (2565). ศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 41(1), 35–48.

Atasoy, M., Eyice, O., Schnürer, A., & Cetecioglu, Z. (2019). Volatile fatty acids production via mixed culture fermentation: Revealing the link between pH, inoculum type and bacterial composition. *Bioresource Technology*, 292, 121889. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121889>

Ahmmad, R. M., & Haque, S. (2014). Providing electricity by digester types on biogas productions from municipal solid waste in Dhaka City, Bangladesh. *International Journal of Energy, Information and Communications*, 5(3), 13–22.

Ali, S., Hua, B., Huang, J. J., Droste, R. L., Zhou, Q., Zhao, W., & Chen, L. (2019). Effect of different initial low pH conditions on biogas production, composition, and shift in the aceticlastic methanogenic population. *Bioresource Technology*, 289, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.09.074>

Bahira, B. Y., Baki, A. S., & Bello, A. (2018). Effect of varying pH on biogas generation using cow dung. *Direct Research Journal of Biology and Biotechnology*, 4(3), 28–33. <https://doi.org/10.26765/DRJAFS.2018.7198>

Bennich, T., & Belyazid, S. (2017). The route to sustainability—Prospects and challenges of the bio-based economy. *Sustainability*, 9(6), 887. <https://doi.org/10.3390/su9060887>

Carucci, G., Carrasco, F., Trifoni, K., Majone, M., & Beccari, M. (2005). Anaerobic digestion of food industry wastes: Effect of co-digestion on methane yield. *Journal of Environmental Engineering*, 131(7), 1037–1045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:7\(1037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:7(1037)

- Ehhalt, D. H. (1967). Methane in the atmosphere. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 17(8), 518–519. <https://doi.org/10.1080/00022470.1967.10469024>
- Emberlin, E., Howay, I., Leasau, Z., Reyes, I., & Roberts, B. (2018). Effect of sugars on the rate of ethanol production during anaerobic respiration of yeast. *Journal of Undergraduate Biology Laboratory Investigations*, 1(1).
- Fernández, A., Sánchez, A., & Font, X. (2005). Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. *Biochemical Engineering Journal*, 26(1), 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.04.018>
- Kalemba, K., & Barbusinski, K. (2017). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and molasses. *E3S Web of Conferences*, 22, 00075. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200075>
- Kanu, I. R., Aspray, T. J., Arthur, S., & Adeloje, A. (2015). Laboratory experiment to select variables for predicting foaming in anaerobic digester. In *Proceedings of the Infrastructure and Environment Scotland 3rd Postgraduate Conference* (pp. 77–83). Heriot-Watt University.
- Konkol, I., Swierczek, L., & Cenian, A. (2018). Biogas production from bakery wastes-dynamics, retention time and biogas potential. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 63(1), 32–34.
- Mancipe-Jiménez, D. C., Costa, C., & Márquez, M. C. (2017). Methanogenesis inhibition by phosphorus in anaerobic liquid waste treatment. *Waste Treatment and Recovery*, 2(1), 1–8.
- Mao, C., Zhang, T., Wang, X., Feng, Y., Ren, G., & Yang, G. (2017). Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. *Scientific Reports*, 7(1), 9379. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09971-7>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Raja, I., & Wazir, S. (2017). Biogas production: The fundamental processes. *Universal Journal of Engineering Science*, 5(2), 29–37. <https://doi.org/10.13189/ujes.2017.050202>
- Santos, A. D., Silva, J. R., Castro, L., & Quinta-Ferreira, R. (2022). A biochemical methane potential of pig slurry. *Energy Reports*, 8, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.244>
- Seachem. (2022, May 14). *Seachem flourish phosphorus*. <https://seachem.my/blogs/news/seachem-flourish-phosphorus>
- Shyan, L. L., Nanyan, N. S. M., Ismail, N., Al-Gheethi, A., Nguyen, H. H. T., Vo, D. V. N., & El Enshasy, H. A. (2023). Effort to mitigate volatile fatty acid inhibition by using mixed inoculum and compost for the degradation of food waste and the production of biogas. *Sustainability*, 15(2), 1185. <https://doi.org/10.3390/su15021185>
- Singharat, K., Sangkarak, S., Pongsuk, O., & Junyapoon, S. (2017). Biogas production from bakery wastewater in two-stage anaerobic digestion system. *KMITL Science and Technology Journal*, 17(1), 103–112.
- Song, Z., Yang, G., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PLoS ONE*, 9(4), e93282. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093282>
- Sun, M., Liu, B., Yanagawa, K., Ha, N. T., Goel, R., Terashima, M., & Yasui, H. (2020). Effects of low pH conditions on decay of methanogenic biomass. *Water Research*, 179, 115883. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115883>
- Tetteh, E. K., & Rathilal, S. (2021). Biogas production from wastewater treatment-evaluating anaerobic and biomagnetic systems. *Water-Energy Nexus*, 4, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.11.002>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zieminski, K., & Kowalska-Wentel, M. (2015). Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. *Bioresource Technology*, 180, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.035>

ความหลากหลายของพรรณไม้ในเส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ (วัดเขาจันทร์งาม) ในอุทยานธรณีโคราช อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา

Species diversity of plants in nature trail at Wat Loet Sawat (Khao Chan Ngam) in Koran Geopark, Sikhio District, Nakhon Ratchasima Province

ธีระ ธรรมวงศา^{1*} และ สายใจ ปอสูงเนิน²

Theera Thummavongsa^{1*} and Saijai Posoongnoen²

Received: 15 April 2024 ; Revised: 28 June 2024 ; Accepted: 19 August 2024

บทคัดย่อ

สำรวจพรรณไม้บริเวณในเส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ (วัดเขาจันทร์งาม) ในอุทยานธรณีโคราช อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างเดือนมกราคม 2565–ธันวาคม 2566 ผลการศึกษาพบพรรณไม้ทั้งสิ้น 117 ชนิด 106 สกุล 50 วงศ์ จำแนกเป็นเฟิร์น จำนวน 6 ชนิด พืชใบเลี้ยงเดี่ยว จำนวน 22 ชนิด และพืชใบเลี้ยงคู่ จำนวน 89 ชนิด วงศ์ที่พบจำนวนชนิดมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ วงศ์ Fabaceae, Poaceae และ Malvaceae จำนวน 17, 7 และ 6 ชนิด ตามลำดับ พบพืชถิ่นเดียวของไทย จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ เปราะโคราช (*Kaempferia koratensis* Picheans.) และมะกัก (*Spondias bipinnata* Airy Shaw & Forman) พืชหายาก จำนวน 1 ชนิด คือ สาธร [*Millettia leucantha* Kurz var. *buteoides* (Gagnep.) P. K. Lôt] และพบพืชต่างถิ่นรุกราน จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ สาบม่วง [*Praxelis clematidea* (Hieron ex Kuntze) R. M. King & H. Rob.] มะขาม (*Tamarindus indica* L.) แมงลักคา (*Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze) โสมคน (*Talinum paniculatum* Gaertn.) ผกากรอง (*Lantana camara* L.) และหญ้าดอกแดง (*Melinis repens* (Willd.) Zizka) ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนการอนุรักษ์พรรณไม้ในพื้นที่และเป็นแหล่งเรียนรู้ในพื้นที่ต่อไป

คำสำคัญ: ความหลากหลายของพรรณไม้, จีโอพาร์ค, ไม้ต้น, ป่าดิบแล้ง

Abstract

Plant diversity at Wat Loet Sawat (Khao Chan Ngam) Nature Trail in Korat Geopark, Sikhio district, Nakhon Ratchasima Province was surveyed between January 2022 and December 2023. One hundred and seventeen species of vascular plants belonging to 106 genera and 50 families were identified. There are six species in ferns, 22 species in monocotyledons and 89 species in dicotyledons. The first three highest number of species are Fabaceae, Poaceae and Malvaceae with 17, 7 and 6 species, respectively. Two species are endemic to Thailand viz. *Kaempferia koratensis* Picheans. and *Spondias bipinnata* Airy Shaw & Forman. One species [*Millettia leucantha* Kurz var. *buteoides* (Gagnep.) P. K. Lôt] is a rare species. Six invasive alien species are also found viz. *Praxelis clematidea* (Hieron ex Kuntze) R. M. King & H. Rob., *Tamarindus indica* L., *Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze, *Talinum paniculatum* Gaertn., *Lantana camara* L. and *Melinis repens* (Willd.) Zizka. The results of this study can be used as basic information for planning the conservation of plants and learning resources in the area.

Keywords: Plant diversity, geopark, tree, dry evergreen forest

¹ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา
Email: theera.t@nrru.ac.th

² สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

¹ Division of Biology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand
Email: theera.t@nrru.ac.th

² Division of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand
Email: saijai.p@nrru.ac.th

* Corresponding author: Email: theera.t@nrru.ac.th

บทนำ

จีโอพาร์ค (geopark) หรืออุทยานธรณี คือ พื้นที่หรือภูมิประเทศที่มีความสำคัญและโดดเด่นทางธรณีวิทยา นิเวศวิทยา ที่มีคุณค่าเป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ นอกจากนี้ จีโอพาร์คยังรวมถึงวัฒนธรรมสำคัญที่สัมพันธ์กับแหล่งธรณีวิทยา ซึ่งในประเทศไทยมีพื้นที่อุทยานธรณีที่สำคัญคือพื้นที่อุทยานธรณีโคราช (Korat geopark) คือ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำลำตะคองตอนกลาง-ล่าง ในเขตอำเภอสีคิ้ว สูงเนิน ชามทะเลสอ เมืองนครราชสีมา และเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดนครราชสีมา มีลักษณะภูมิประเทศเขาควมสตา (เขามือถือ) มีข้อมูลของซากดึกดำบรรพ์ (fossil) ถึง 3 ยุค และยังมีระบบนิเวศป่าดงรังและป่าดิบแล้ง และวิถีชีวิตของผู้นมายาวนานกว่า 4,000 ปี (กรมทรัพยากรธรณี, 2564)

วัดเลิศสวัสดิ์ หรือที่คนทั่วไปรู้จักในชื่อวัดเขาจันทร์งาม ตั้งอยู่ที่บ้านเลิศสวัสดิ์ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา มีพื้นที่ 1,501 ไร่ 3 งาน 65 ตารางวา บริเวณวัดเลิศสวัสดิ์มีพื้นที่อยู่ในเขตโคราชจีโอพาร์ค ซึ่งในปี พ.ศ. 2565 ได้รับการรับรองจากองค์การยูเนสโกให้เป็นพื้นที่อุทยานธรณีโลกแห่งที่ 2 ของไทย มีลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่า มีความอุดมสมบูรณ์ของพรรณไม้ และเป็นแหล่งท่องเที่ยวศึกษาธรรมชาติอุทยานธรณีที่สำคัญของจังหวัดนครราชสีมา โดยพื้นที่วัดเลิศสวัสดิ์มีศักยภาพในการเป็นมรดกทางธรรมชาติสูง มีความหลากหลายของชนิดพรรณไม้ในป่าดิบแล้ง และยังมีกิจกรรมการศึกษาธรรมชาติและการท่องเที่ยวเชิงธรณีวิทยา (Duangkrayom *et al.*, 2022) นอกจากนี้ ยังมีการค้นพบภาพเขียนสีโบราณยุคหินใหม่อายุราว 3,000–4,000 ปี (สำนักงานอุทยานธรณีโคราช มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, 2561) จึงเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่ทำให้มีคอนสนใจมาท่องเที่ยวเป็นจำนวนมาก

พื้นที่วัดเลิศสวัสดิ์เป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญของจังหวัดนครราชสีมา ทางวัดและหน่วยงานต่างๆ ในพื้นที่มีการพัฒนาพื้นที่โดยรอบให้เป็นแหล่งศึกษาทางธรรมชาติให้กับนักท่องเที่ยวที่สนใจและบุคคลทั่วไปในการศึกษาธรรมชาติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจจำนวนชนิดและสถานะการอนุรักษ์ของพรรณไม้ บริเวณเส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา เพื่อนำมาเป็นข้อมูลให้กับนักท่องเที่ยวและบุคคลที่สนใจ

การทดลอง

1. สำรวจความหลากหลายของชนิดพรรณไม้บริเวณในเส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ ระยะทาง 1.68 กิโลเมตร ระหว่างเดือนมกราคม 2565–ธันวาคม 2566 เดือนละ 1 ครั้ง บันทึกข้อมูล เช่น ลักษณะนิสัย ช่วงเวลาออกดอก สีดอก บันทึกภาพ เก็บตัวอย่างตามหลักอนุกรมวิธานพืชเพื่อระบุชนิดและจัดทำเป็นตัวอย่างพรรณไม้แห้งเพื่อเป็นพรรณไม้อ้างอิง

2. การระบุชนิดโดยนำตัวอย่างพืชมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ ณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ตรวจเอกลักษณ์และระบุชื่อวิทยาศาสตร์ของพรรณไม้โดยใช้รูปพรรณจากเอกสารทางอนุกรมวิธาน ได้แก่ หนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย (Flora of Thailand) หนังสือชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันท์ (สำนักงานหอพรรณไม้, 2557) และคู่มือจำแนกพรรณไม้ (ก่องกานดา ชยามฤต, 2541) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3. ระบุข้อมูลสถานภาพการอนุรักษ์ของพืชที่พบ โดยตรวจสอบจากบัญชี The IUCN Red List of Threatened Species (World Conservation Monitoring Centre, 2023) คู่มือพืชที่ถูกคุกคามในประเทศไทย (Chamchumroon *et al.*, 2017) และหนังสือพืชต่างถิ่นรุกรานในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ (สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, 2556) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Picheansoonthon, 2011)

ผลการทดลอง

เส้นทางศึกษาธรรมชาติวัดเลิศสวัสดิ์ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ระยะทาง 1.68 กิโลเมตร มีลักษณะเป็นป่าดิบแล้ง ระหว่างทางจะพบลานหิน ลำธาร และภาพเขียนสีโบราณ อายุประมาณ 4,000 ปี แสดงวิถีชีวิตของมนุษย์ยุคโบราณในพื้นที่ซึ่งเป็นจุดสนใจของนักท่องเที่ยว (Figure 1)

พบพรรณไม้ทั้งสิ้น 117 ชนิด 106 สกุล 50 วงศ์ เป็นเฟิน 6 ชนิด พืชใบเลี้ยงเดี่ยว 22 ชนิด และพืชใบเลี้ยงคู่ 89 ชนิด วงศ์ที่พบจำนวนชนิดมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ วงศ์ Fabaceae วงศ์ Poaceae และวงศ์ Malvaceae จำนวน 17, 7 และ 6 ชนิด ตามลำดับ (Table 1 and Figure 2)

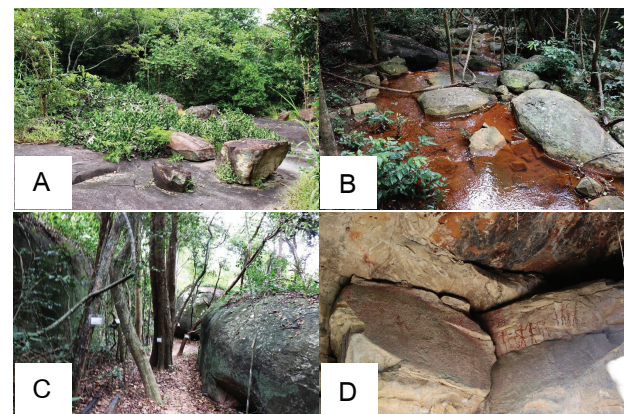


Figure 1 Nature trail at Wat Loet Sawat, Sikhio district, Nakhon Ratchasima Province (A) Stone courtyard (B) stream (C) dry evergreen forest (D) prehistoric paintings

การระบุสถานภาพของพืชตามบัญชี IUCN Red list พบพืชในบัญชีจำนวน 66 ชนิด โดยแบ่งเป็น พืชใกล้สูญพันธุ์อย่างยิ่ง (critically endangered species) จำนวน 1 ชนิด คือ พะยูง (*Dalbergia cochinchinensis*) พืชใกล้สูญพันธุ์ (endangered species) จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เตี้ยมค่นอง (*Anthoshorea henryana*) ตะเคียนหิน (*Hopea ferrea*) และ ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) พืชใกล้ถูกคุกคาม (near threatened species) จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ เกล้ง (*Dialium cochinchinense*) และค่างขาว (*Aglaia edulis*) พืชเป็นกังวลน้อยที่สุด (least concern species) จำนวน 58 ชนิด และพืชมี

ข้อมูลไม่เพียงพอ จำนวน 2 ชนิด (Table 1) นอกจากนี้ยังพบ พืชหายาก (rare species) ตามเกณฑ์ของ Chamchumroon *et al.* (2017) จำนวน 1 ชนิด คือ สารภี (*Millettia leucantha* var. *buteoides*) พืชถิ่นเดียว (endemic species) จำนวน 2 ชนิด คือ เปราะโคราช (*Kaempferia koratensis*) และมะกัก (*Spondias bipinnata*) นอกจากนี้ ยังพบพืชต่างถิ่นรุกราน จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ สามม่วง (*Praxelis clematidea*) มะขาม (*Tamarindus indica*) แมงลักคา (*Mesosphaerum suaveolens*) โสมคน (*Talinum paniculatum*) ผกากรอง (*Lantana camara*) หญ้าดอกแดง (*Melinis repens*)

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail.

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
Ferns						
1	Aspleniaceae	<i>Asplenium yoshinagae</i> Makino	-	EF	-	Thummavongsa 2023-61
2	Dennstaedtiaceae	<i>Microlepia matthewii</i> Christ	-	TerF	-	Thummavongsa 2022-03
3	Polypodiaceae	<i>Drynaria rigidula</i> (Sw.) Bedd.	กระปรอกเล็ก	EF/LF	-	Thummavongsa 2023-59
4	Polypodiaceae	<i>Microsorium punctatum</i> (L.) Copel.	กระปรอกหางสิงห์	EF/LF	-	Thummavongsa 2022-22
5	Polypodiaceae	<i>Selliguea oxyloba</i> (Wall. ex Kunze) Freser-Jenk.	กูดห้อม	EF	-	Thummavongsa 2022-29
6	Pteridaceae	<i>Hemionitis ludens</i> (Wall. ex Hook.) Christenh.	-	TerF	-	Thummavongsa 2022-39
Monocotyledonous Plants						
7	Araceae	<i>Aglaonema simplex</i> Blume	ว่านขันทมหาก	H	Least concern	Thummavongsa 2023-62
8	Asparagaceae	<i>Dracaena cochinchinensis</i> (Lour.) S. C. Chen	จันทร์แดง	SL/STL	Least concern	Thummavongsa 2022-12
9	Asparagaceae	<i>Amorphophallus</i> sp.	บุก	H	-	Thummavongsa 2022-01
10	Asparagaceae	<i>Scindapsus officinalis</i> (Roxb.) Schott	เครือข่อย	C	-	Thummavongsa 2023-03
11	Commelinaceae	<i>Commelina paludosa</i> Blume	หญ้ากาบไผ่	H	-	Thummavongsa 2022-30
12	Commelinaceae	<i>Cyanotis cristata</i> Roem. & Schult.	หญ้าหัวรากน้อย	H	Least concern	Thummavongsa 2023-58
13	Commelinaceae	<i>Murdannia nudiflora</i> (L.) Brenan	กินกุ้งน้อย	H	-	Thummavongsa 2022-02
14	Commelinaceae	<i>Murdannia</i> sp.	-	H	-	Thummavongsa 2022-04

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail. (continue)

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
15	Cyperaceae	<i>Cyperus cyperoides</i> (L.) Kuntze	หญ้าร้างกา	H	Least concern	Thummaavongsa 2022-38
16	Cyperaceae	<i>Cyperus laxus</i> Lam. var. <i>laxus</i>	หญ้าตีนกา	H	-	Thummaavongsa 2023-02
17	Dioscoreaceae	<i>Dioscorea</i> sp.	มันป่า	HC	-	Thummaavongsa 2023-55
18	Orchidaceae	<i>Cleisostoma williamsonii</i> (Rchb.f.) Garay	เอื้องพวงชมพู	EO	-	Thummaavongsa 2022-40
19	Poaceae	<i>Centotheca lappacea</i> (L.) Desv.	หญ้าเหนียวหมา	G	-	Thummaavongsa 2022-31
20	Poaceae	<i>Cyrtococcum patens</i> (L.) A. Camus	หญ้าไขเหา	G	-	Thummaavongsa 2023-01
21	Poaceae	<i>Digitaria setigera</i> Roth.	-	G	-	Thummaavongsa 2022-37
22	Poaceae	<i>Heteropogon contortus</i> (L.) Beauv. ex Roem. & Schult.	หญ้าหนวดถั่ว	G	-	Thummaavongsa 2022-13
23	Poaceae	<i>Melinis repens</i> (Willd.) Zizka	หญ้าดอกแดง	EG	-	Thummaavongsa 2022-5
24	Poaceae	<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) Kerguelen	หญ้าหางหมาจิ้งจอก	G	Least concern	Thummaavongsa 2022-28
25	Poaceae	<i>Thyrsostachys siamensis</i> Gamble	ไผ่รวก	B	-	Thummaavongsa 2023-60
26	Zingiberaceae	<i>Curcuma</i> sp.	-	H	-	Thummaavongsa 2022-41
27	Zingiberaceae	<i>Kaempferia koratensis</i> Pichens.	เปราะโคราช	H	-	Thummaavongsa 2023-54
28	Zingiberaceae	<i>Zingiber</i> sp.	-	H	-	Thummaavongsa 2022-14
Dicotyledonous Plants						
29	Achariaceae	<i>Hydnocarpus ilicifolius</i> King	กระเบาหลัก	ST	Least concern	Thummaavongsa 2023-56
30	Anacardiaceae	<i>Mangifera caloneura</i> Kurz	มะม่วงป่า	T	Least concern	Thummaavongsa 2022-23
31	Anacardiaceae	<i>Spondias bipinnata</i> Airy Shaw & Forman	มะกัก	T	-	Thummaavongsa 2023-63
32	Annonaceae	<i>Desmos chinensis</i> Lour.	สายหยุด	C	-	Thummaavongsa 2022-36
33	Annonaceae	<i>Huberantha cerasoides</i> (Roxb.) Chaowasku	กระเจียน	ST	Least concern	Thummaavongsa 2023-04
34	Annonaceae	<i>Monoon viride</i> (Craib) B. Xue & R. M. K. Saunders	ยางโอน	T	-	Thummaavongsa 2023-57

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail. (continue)

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
35	Annonaceae	<i>Sphaerocoryne lefevrei</i> (Baill.) D. M. Johnson & N. A. Murray	ลำตวน	ST	-	Thummavongsa 2022-43
36	Annonaceae	<i>Xylopia vielana</i> Pierre	กล้วยน้อย	T	Least concern	Thummavongsa 2022-27
37	Apocynaceae	<i>Cynanchum viminalis</i> (L.) L. subsp. <i>viminalis</i>	พญาไร้ใบ	C	-	Thummavongsa 2023-40
38	Apocynaceae	<i>Hoya</i> sp.	-	C	-	Thummavongsa 2023-69
39	Apocynaceae	<i>Wrightia pubescens</i> R. Br.	โมกมัน	ST	Least concern	Thummavongsa 2023-05
40	Asteraceae	<i>Praxelis clematidea</i> (Hieron ex Kuntze) R. M. King & H. Rob.	สามม่วง	H		Thummavongsa 2022-24
41	Balanophoraceae	<i>Balanophora latisepala</i> Lec.	กากหมาก	PaH	-	Thummavongsa 2023-72
42	Cannabaceae	<i>Celtis timorensis</i> Span.	แก้งข้าพระร่วง	T	Least concern	Thummavongsa 2022-11
43	Celastraceae	<i>Siphonodon celastrineus</i> Griff.	มะตูก	T	Least concern	Thummavongsa 2023-15
44	Combretaceae	<i>Terminalia corticosa</i> Pierre ex Craib & Hutch.	ตะแบกเลือด	T	Least concern	Thummavongsa 2023-06
45	Convolvulaceae	<i>Argyreia mollis</i> (Burm. f.) Choisy	เครือพูเงิน	HC	-	Thummavongsa 2023-53
46	Crassulaceae	<i>Kalanchoe laciniata</i> (L.) DC.	ข้องสามย่าน	H	-	Thummavongsa 2023-46
47	Dipterocarpaceae	<i>Anthoshorea henryana</i> (Pierre ex Laness.) P. S. Ashton & J. Heck.	เคี่ยมคะนอง	T	Endangered	Thummavongsa 2022-16
48	Dipterocarpaceae	<i>Hopea ferrea</i> Laness	ตะเคียนหิน	T	Endangered	Thummavongsa 2022-06
49	Ebenaceae	<i>Diospyros decandra</i> Lour.	จัน	T	-	Thummavongsa 2023-14
50	Ebenaceae	<i>Diospyros mollis</i> Griff.	มะเกลือ	T	-	Thummavongsa 2023-38
51	Ebenaceae	<i>Diospyros oblonga</i> Wall. ex G.Don	โมรี	T	-	Thummavongsa 2023-71
52	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia antiquorum</i> L.	สลัดไดป่า	S/ST	Least concern	Thummavongsa 2022-32
53	Euphorbiaceae	<i>Hura crepitans</i> L.	โพฝรั่ง	ExT	Least concern	Thummavongsa 2023-68
54	Euphorbiaceae	<i>Mallotus philippensis</i> (Lam.) Müll. Arg.	คำแสด	ST	Least concern	Thummavongsa 2022-15
55	Fabaceae	<i>Albizia myriophylla</i> Benth	ชะเอมไทย	C	Least concern	Thummavongsa 2022-17

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail. (continue)

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
56	Fabaceae	<i>Albizia odoratissima</i> (L. f.) Benth	กางขี้มอด	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-22
57	Fabaceae	<i>Cassia fistula</i> L.	ราชพฤกษ์	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-39
58	Fabaceae	<i>Dalbergia cochinchinensis</i> Pierre	พะยูน	T	Critically endangered	Thummaavongsa 2023-07
59	Fabaceae	<i>Dalbergia nigrescens</i> Kurz	ฉนวน	T	Data Deficient	Thummaavongsa 2023-32
60	Fabaceae	<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	หางนกยูงฝรั่ง	ExT	Least concern	Thummaavongsa 2023-12
61	Fabaceae	<i>Dialium cochinchinense</i> Pierre	เขลง, นางดำ	T	Near threatened	Thummaavongsa 2023-09
62	Fabaceae	<i>Dunbaria punctata</i> (Wight & Arn.) Benth.	ถั่วปากอ้า	C	Least concern	Thummaavongsa 2023-37
63	Fabaceae	<i>Dysolobium pilosum</i> (J. G. Klein ex Willd.) Maréchal	ถั่วบังผักเล็ก	C	-	Thummaavongsa 2023-45
64	Fabaceae	<i>Erythrina fusca</i> Lour.	ทองไหล	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-52
65	Fabaceae	<i>Grona styracifolia</i> (Osbeck) H. Ohashi & K. Ohashi	ผีเสื้อน้ำ	H	-	Thummaavongsa 2023-11
66	Fabaceae	<i>Grona triflora</i> (L.) H. Ohashi & K. Ohashi	หญ้าเกล็ดหอย	H	-	Thummaavongsa 2022-21
67	Fabaceae	<i>Millettia leucantha</i> Kurz var. <i>buteoides</i> (Gagnep.) P. K. Lôt	สาร	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-41
68	Fabaceae	<i>Pterocarpus macrocarpus</i> Kurz	ประตู่	T	Endangered	Thummaavongsa 2023-21
69	Fabaceae	<i>Senna garrettiana</i> (Craib) Irwin & Barneby	แสสมสาร	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-18
70	Fabaceae	<i>Senna siamea</i> (Lam.) Irwin & Barneby	ขี้เหล็ก	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-08
71	Fabaceae	<i>Tamarindus indica</i> L.	มะขาม	ExT	Least concern	Thummaavongsa 2023-31
72	Hypericaceae	<i>Cratoxylum formosum</i> (Jacq) Benth. & Hook. f. ex Dyer subsp. <i>formosum</i>	ตัวขาว	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-13
73	Irvingiaceae	<i>Irvingia malayana</i> Oliv. ex A. W. Benn	กระบก	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-36
74	Lamiaceae	<i>Mesosphaerum suaveolens</i> (L.) Kuntze	แมงลัก	S	Least concern	Thummaavongsa 2023-33
75	Lamiaceae	<i>Vitex peduncularis</i> Wall. ex Schauer	กาสามปี	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-19
76	Lamiaceae	<i>Vitex quinata</i> (Lour.) F. N. Williams	อีแปะ	ST	Least concern	Thummaavongsa 2023-44

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail. (continue)

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
77	Lauraceae	<i>Dehaasia candolleana</i> (Meisn.) Kosterm.	สีไหมใบใหญ่	T	Least concern	Thummavongsa 2022-10
78	Linderniaceae	<i>Bonnaya ciliata</i> (Colsm.) Spreng.	ผักหอมช่อป่า	H	Least concern	Thummavongsa 2023-16
79	Linderniaceae	<i>Torenia crustacea</i> (L.) Cham. & Schldl.	หญ้า กาบหอย ตัวเมีย	H	Least concern	Thummavongsa 2023-29
80	Malvaceae	<i>Abutilon indicum</i> (L.) Sweet	มะก่องข้าว	S	-	Thummavongsa 2023-50
81	Malvaceae	<i>Bombax anceps</i> Pierre	จี่ป่า	T	Least concern	Thummavongsa 2023-20
82	Malvaceae	<i>Microcos tomentosa</i> Sm.	พลับพล	T	Least concern	Thummavongsa 2022-18
83	Malvaceae	<i>Pterocymbium tinctorium</i> (Blanco) Merr.	ปออีแก	T	Least concern	Thummavongsa 2023-23
84	Malvaceae	<i>Pterospermum acerifolium</i> (L.) Willd.	กะหนานปลิง	T	Least concern	Thummavongsa 2023-10
85	Malvaceae	<i>Sterculia pexa</i> Pierre	ปอขาว	ST/T	Least concern	Thummavongsa 2023-34
86	Melastomataceae	<i>Memecylon caeruleum</i> Jack var. <i>caeruleum</i>	พลองใหญ่	S/T	-	Thummavongsa 2023-26
87	Melastomataceae	<i>Memecylon ovatum</i> Sm.	พลองกินลูก	S/T	Least concern	Thummavongsa 2023-51
88	Meliaceae	<i>Aglaia edulis</i> (Roxb.) Wall.	ค้ำคาว	T	Near threatened	Thummavongsa 2023-24
89	Meliaceae	<i>Sandoricum koetjape</i> (Burm. f.) Merr.	กระท้อน	T	Least concern	Thummavongsa 2023-17
90	Meliaceae	<i>Walsura trichostemon</i> Miq.	กัตลิ้น	T	Least concern	Thummavongsa 2022-45
91	Moraceae	<i>Artocarpus lacucha</i> Roxb. ex Buch.-Ham.	หาด, มะหาด	T	-	Thummavongsa 2023-42
92	Moraceae	<i>Ficus microcarpa</i> L. f.	ไผ่	T	Least concern	Thummavongsa 2022-08
93	Moraceae	<i>Streblus asper</i> Lour.	ข่อย	T	Least concern	Thummavongsa 2023-64
94	Moraceae	<i>Taxotrophis taxoides</i> (B. Heyne ex Roth) Chew ex E. M. Gardner	ข่อยน้ำ	S/T	Least concern	Thummavongsa 2023-30
95	Myrtaceae	<i>Syzygium</i> sp.	-	T	-	Thummavongsa 2023-35
96	Oleaceae	<i>Chionanthus microstigma</i> (Gagnep.) P. S. Green	กระโดนแดง	T	Least concern	Thummavongsa 2023-27
97	Opiliaceae	<i>Cansjera rheedei</i> J. F. Gmel	นางจุ่ม	S	-	Thummavongsa 2023-25

Table 1 List of plants in Wat Loet Sawat nature trail. (continue)

No	Family	Scientific name	Local name	Habit	The IUCN Red List Categories	Voucher specimens
98	Piperaceae	<i>Peperomia pellucida</i> (L.) Kunth	ผักกระสัง	H	-	Thummaavongsa 2023-43
99	Phyllanthaceae	<i>Breynia androgyna</i> (L.) Chakrab. & N. P. Balakr.	ผักหวานบ้าน	S	Least concern	Thummaavongsa 2023-70
100	Phyllanthaceae	<i>Cleistanthus helferi</i> Hook.f.	นกนอน	S/ST	Least concern	Thummaavongsa 2022-07
101	Phyllanthaceae	<i>Emblia collinsiae</i> (Craib) R.W.Bouman	แขนงพริ้ว	S/S	Data Deficient	Thummaavongsa 2023-47
102	Phyllanthaceae	<i>Emblia officinalis</i> Gaertn.	มะขามป้อม	ST/T	Least concern	Thummaavongsa 2022-20
103	Portulacaceae	<i>Talinum paniculatum</i> Gaertn.	โสมคน	H	-	Thummaavongsa 2022-25
104	Portulacaceae	<i>Portulaca pilosa</i> L.	สารพัดพิษ	EH	-	Thummaavongsa 2023-65
105	Rubiaceae	<i>Ixora cibdela</i> Craib	เข็มป่า	ST	Least concern	Thummaavongsa 2022-33
106	Rubiaceae	<i>Pavetta indica</i> L.	เข็มป่า	S	Least concern	Thummaavongsa 2022-35
107	Rubiaceae	<i>Ridsdalea wittii</i> (Craib) J. T. Pereira	หมักม้อ	S	-	Thummaavongsa 2023-48
108	Rutaceae	<i>Glycosmis pentaphylla</i> (Retz.) DC.	เขยตาย	S/ST	Least concern	Thummaavongsa 2022-42
109	Rutaceae	<i>Micromelum minutum</i> (G. Forst.) Wight & Arn. var. <i>minutum</i>	สมัดน้อย	S/ST	Least concern	Thummaavongsa 2022-44
110	Rutaceae	<i>Murraya paniculata</i> (L.) Jack	แก้ว	S/ST	-	Thummaavongsa 2023-66
111	Sapindaceae	<i>Lepisanthes rubiginosa</i> (Roxb.) Leenh.	มะหวด	S/ST	Least concern	Thummaavongsa 2022-09
112	Sapindaceae	<i>Lepisanthes tetraphylla</i> (Vahl) Radlk.	มะเฟืองช้าง	ST/T	Least concern	Thummaavongsa 2023-49
113	Sapindaceae	<i>Nephelium hypoleucum</i> Kurz	คอดแลน	T	Least concern	Thummaavongsa 2022-34
114	Stemonaceae	<i>Stemona collinsiae</i> Craib	หนอน ตายหยาก	HC	Least concern	Thummaavongsa 2023-67
115	Ulmaceae	<i>Holoptelea integrifolia</i> Planch.	กระเซา	T	Least concern	Thummaavongsa 2023-28
116	Verbenaceae	<i>Lantana camara</i> L.	ผกากรอง	Exc	-	Thummaavongsa 2022-26
117	Vitaceae	<i>Tetrastigma</i> sp.	-	C	-	Thummaavongsa 2022-19

Not : B = Bamboo, C = Climber, EC = Exotic climber, EF = Epiphytic fern, EO = Epiphytic orchid, EG = Exotic grass, EH= Exotic herb, ET = Exotic tree, G = Grass, H = Herb, HC = Herbaceous climber, LF = Lythophytic fern, PaH = Parasitic herb, S = Shrub, SL = Shrub-like, ST = Shrubby tree, STL= Shrubby tree-like, T = Tree, TerF = Terrestrial fern, US = Undershrub

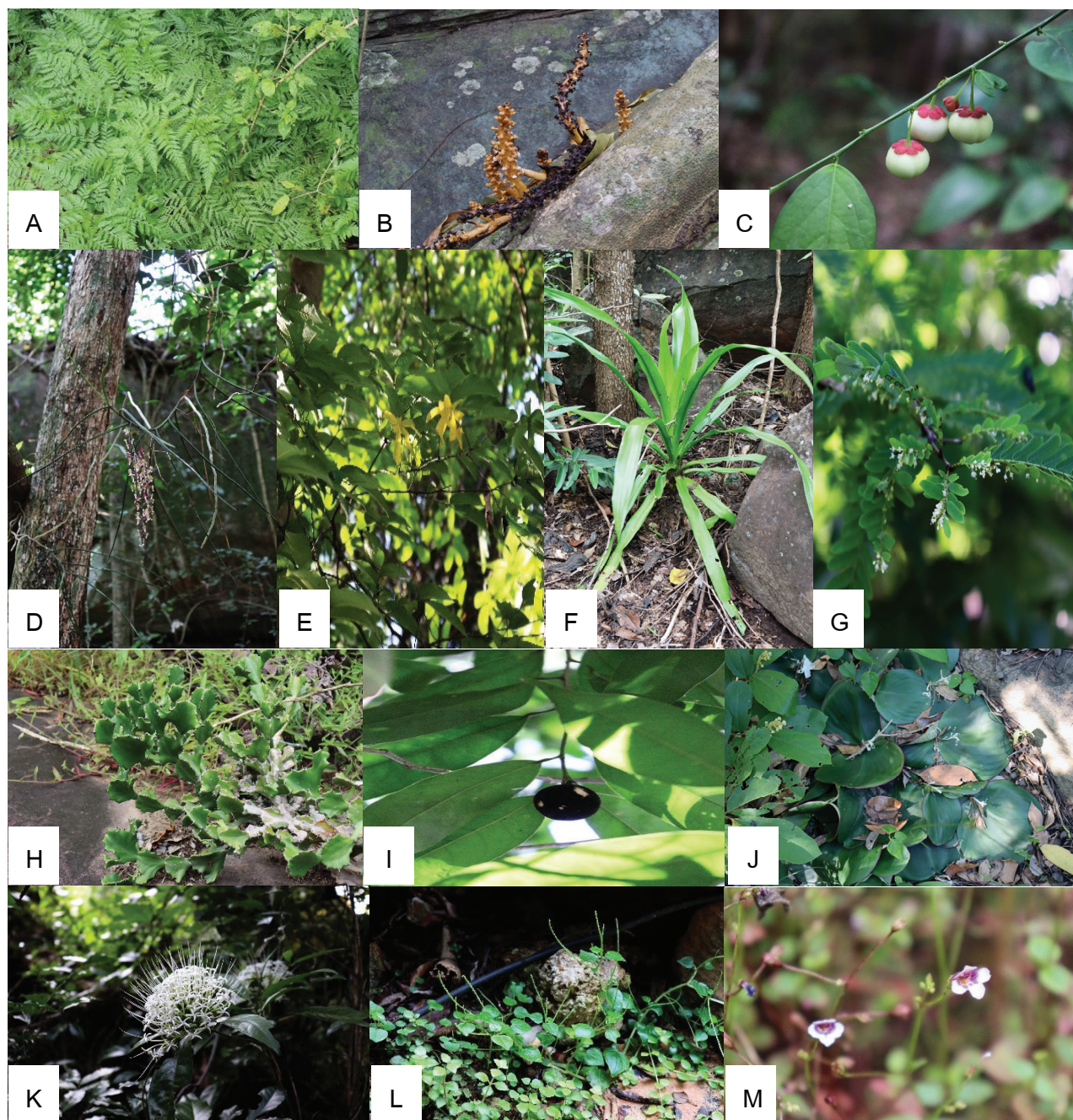


Figure 2 Some species of plant in Wat Loet Sawat nature trail (A) *Asplenium yoshinagae* (B) *Balanophora latisejala* (C) *Breynia androgyna* (D) *Cleisostoma williamsonii* (E) *Desmos chinensis* (F) *Dracaena cochinchinensis* (G) *Emblca officinalis* (H) *Euphorbia antiquorum* (I) *Hydnocarpus ilicifolius* (J) *Kaempferia koratensis* (K) *Pavetta indica* (L) *Peperomia pellucida* (M) *Torenia crustacea*

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาพรรณไม้ในเส้นทางศึกษาธรรมชาติ วัดเลิศสวัสดิ์ พบพรรณไม้ 117 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับ การสำรวจพรรณไม้บริเวณใกล้เคียง พบว่ามีจำนวนชนิดของ พรรณไม้มากกว่าบริเวณป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา (ชนิดป่าเต็งรัง ขนาดของพื้นที่ 50 ไร่) และ ป่าชุมชนบ้านโนนชาด ตำบลท่าลาด อำเภอชุมพวง จังหวัด นครราชสีมา (ชนิดป่าเต็งรัง ขนาดของพื้นที่ 126 ไร่) ซึ่ง

พบพรรณไม้จำนวน 51 และ 57 ชนิดตามลำดับ (เทียมหทัย ชูพันธ์, 2564; ผุสดี พรหมประสิทธิ์ และคณะ, 2562) โดยมีสภาพป่ามีความแตกต่างกัน และในป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ มีจำนวนพื้นที่น้อย และสภาพป่าที่แตกต่างกันจึงทำให้พบ จำนวนชนิดแตกต่างกัน และการศึกษาพรรณไม้บริเวณ วัดเลิศสวัสดิ์พบจำนวนชนิดน้อยกว่าในบางพื้นที่ เช่น ป่าชุมชน เทศบาลตำบลเมืองใหม่โคกกรวด อำเภอเมืองนครราชสีมา (ชนิดป่าเต็งรัง ขนาดของพื้นที่ 70 ไร่) และวัดป่าเขาคงคา

อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา (ชนิดป่าเต็งรังและป่าเพอพรรณ ขนาดของพื้นที่ 500 ไร่) ซึ่งพบจำนวน 241 และ 195 ชนิดตามลำดับ (เทียมหทัย ชูพันธ์, 2559; เทียมหทัย ชูพันธ์ และคณะ, 2563) เนื่องจากความแตกต่างของสภาพป่า สภาพพื้นที่ และการศึกษาค้นคว้าสำรวจเฉพาะเส้นทางศึกษาธรรมชาติเท่านั้นจึงทำให้พบจำนวนชนิดน้อยกว่า โดยการศึกษาดูพรรณไม้ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาส่วนใหญ่วงศ์พืชที่พบมากที่สุด คือ วงศ์ถั่ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ โดยพืชวงศ์ถั่วมีความหลากหลายของจำนวนชนิดมากเป็นหนึ่ง在三ของวงศ์พืชที่พบมากที่สุดทั่วโลก และพบในนิเวศที่หลากหลายทั่วโลก ซึ่งมีประมาณ 770 สกุล และมากกว่า 19,500 ชนิด (Lewis *et al.*, 2005; The Legume Phylogeny Working Group, 2013, 2017) และในประเทศไทยพบมากประมาณ 102 สกุล 614 ชนิด (Niyomdham, 1994) จึงทำให้พบพืชวงศ์ถั่วจำนวนมาก พรรณไม้วงศ์ที่พบจำนวนชนิดเพียง 1 ชนิด มี 26 วงศ์ ได้แก่ วงศ์ Aspleniaceae, Dennstaedtiaceae, Pteridaceae, Achariaceae, Asparagaceae, Asteraceae, Balanophoraceae, Cannabaceae, Celastraceae, Combretaceae, Convolvulaceae, Crassulaceae, Hypericaceae, Irvingiaceae, Lauraceae, Myrtaceae, Oleaceae, Opiliaceae, Piperaceae, Portulacaceae, Stemonaceae, Ulmaceae, Vitaceae, Dioscoreaceae และ Orchidaceae

เมื่อพิจารณาสถานภาพของพรรณไม้ในพื้นที่พบพืชใกล้สูญพันธุ์อย่างยิ่ง 1 ชนิด คือ พะยุง (*Dalbergia cochinchinensis*) และพืชใกล้สูญพันธุ์ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เตี้ยมคะนอง (*Anthoshorea henryana*) ตะเคียนหิน (*Hopea ferrea* Laness) ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus*) (World Conservation Monitoring Centre, 2023) มีการพบพืชถิ่นเดียวจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ เปราะโคราช (*Kaempferia koratensis*) (Picheansoonthon, 2011) และมะกัก (*Spondias bipinnata*) พืชหายาก จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ และสาธร (*Milletia leucantha* var. *buteoides*) (Chamchumroon *et al.*, 2017) จึงควรมีการอนุรักษ์พืชเหล่านี้โดยการห้ามตัดพรรณไม้และควรมีการขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนในพื้นที่

นอกจากนี้ ยังพบพรรณไม้ที่ควรเฝ้าระวังโดยเป็นพืชที่เป็นพืชต่างถิ่นรุกราน (invasive alien species) จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ สาบม่วง (*Praxelis clematidea*) มะขาม (*Tamarindus indica*) แมงลักคา (*Mesosphaerum suaveolens*) โสมคน (*Talinum paniculatum*) ผกากรอง (*Lantana camara*) และหญ้าดอกแดง (*Melinis repens*) (สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช, 2556) ซึ่งพืชรุกรานบางชนิดที่พบอาจส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของพืชอื่นในพื้นที่ เช่น มะขาม มีรายงานว่า เป็นพืชต่างถิ่นรุกรานที่มีการเจริญเติบโตได้ดี

ในทุกสภาวะ มีเรือนยอดแผ่ขยายกว้างทำให้แสงส่องลงมาพื้นดินได้น้อย และในใบของมะขามยังพบสารเคมี (allelopathic) ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชอื่น (Syeda *et al.*, 2003) จึงควรมีการจัดการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่างถิ่นรุกรานเหล่านี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพระครูศีลวัตร (พระอาจารย์ประเสริฐ รุขิตสิโล) เจ้าอาวาสวัดเลิศสวัสดิ์ และเจ้าหน้าที่ ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าศึกษาวิจัยในพื้นที่ และศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2564). คู่มือผู้เฝ้าระวังธรณี ทะลุมิติแหล่งธรณีวิทยาจันทรม (เที่ยวไปกับจีโอและปิ่นโต). ขอนแก่นการพิมพ์.
- กองกานดา ชยามฤต. (2541). คู่มือจำแนกพรรณไม้. ไดมอนด์พริ้นติ้ง.
- เทียมหทัย ชูพันธ์. (2564). ความหลากหลายของพรรณไม้ในป่าชุมชนบ้านบัลลังก์ อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา. วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, 1(1), 1–10.
- เทียมหทัย ชูพันธ์. (2559). ความหลากหลายของพรรณพืชในป่าชุมชนเพื่อการอนุรักษ์ เทศบาลตำบลเมืองใหม่โคกกรวด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา. วารสารพฤกษศาสตร์ไทย, 8(2), 213–229.
- เทียมหทัย ชูพันธ์, นาริชา วาดี, ศรัญญา กล้าหาญ, สุนิษา ยัมละมัย และสุวรรณี อุดมทรัพย์. (2563). ความหลากหลายของพรรณพืชในวัดป่าเขาคงคา อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา. วารสาร PSRU Journal of Science and Technology, 5(3), 74–96.
- ดุสิต พรหมประสิทธิ์, ธีรรัตน์ ประมูลศิลป์, สุวิสา จันทรโท และวรชาติ โตแก้ว. (2562). ความหลากหลายและการใช้ประโยชน์ของพืชในป่าชุมชนบ้านโนนชาด ตำบลท่าลาด อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา. วารสาร PSRU Journal of Science and Technology, 4(3), 37–47.
- สำนักงานหอพรรณไม้. (2557). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย เต็ม สมิตินันท์ ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2557. โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ.
- สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช. (2556). พืชต่างถิ่นรุกรานในพื้นที่ป่าอนุรักษ์. ชุมชุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ

- สำนักงานอุทยานธรณีโคราช มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา. (2561). *อุทยานธรณีโคราช*. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
- Chamchumroon, V., Suphuntee, N., Tetsana, N., Poopath, M., & Tanikkool, S. (2017). *Threatened plants in Thailand*. Office of the Forest Herbarium, Forest and Plant Conservation Research Office.
- Duangkrayom, J., Jintasakul, P., Songtham, W., Kruainok, P., Naksri, W., Thongdee, N., Grote, P. G., Phetprayoona, T., Janjitpaiboonb, K., & Meepoka, R. (2022). Geodiversity in Khorat Geopark, Thailand: Approaches to geoconservation and sustainable development. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(4), 569–596. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.09.003>
- Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B., & Lock, M. (Eds.). (2005). *Legumes of the world*. Royal Botanic Gardens, Kew.
- Niyomdham, C. (1994). Key to the genera of Thai papilionaceous plant. *Thai Forest Bulletin (Botany)*, 22, 26–88.
- Picheansoonthon, C. (2011). Two new Kaempferia (Zingiberaceae) from Thailand. *Japanese Journal of Botany*, 86(1), 1–8.
- Syeda, S. P., Mohammad, M. P., Eiji, N., Hiroshi, G., & Yoshiharu, F. (2003). *Tamarindus indica* L. leaf is a source of allelopathic substance. *Plant Growth Regulation*, 40(2), 107–115. <https://doi.org/10.1023/A:1027387126878>
- The Legume Phylogeny Working Group (LPWG). (2013). Legume phylogeny and classification in the 21st century: Progress, prospects and lessons for other species-rich clades. *Taxon*, 62(2), 217–248. <https://doi.org/10.12705/622.8>
- The Legume Phylogeny Working Group (LPWG). (2017). A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. *Taxon*, 66(1), 44–77. <https://doi.org/10.12705/661.3>
- World Conservation Monitoring Centre. (2023, November 20). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Retrieved from <http://www.iucnredlist.org>

ผลของการเติมพืชสมุนไพรต่อคุณสมบัติทางเคมี จุลินทรีย์ และคุณภาพของแหนมหมู

Effects of adding medicinal plants on chemical properties, microbial, and quality of Nham (Fermented pork)

พรทิพพา พิณญาพงษ์^{1*}, จิตทิพร เทียรธนิติกุล² และ อัมพวัน วิริยะรัตนกุล³

Pornthippa Pinyaphong^{1*}, Thitiphorn Thiankhanithikun² and Amphawan Wiriyanattanakul³

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมพืชสมุนไพรต่อคุณสมบัติทางเคมี จุลินทรีย์ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์แหนมหมู โดยใช้สมุนไพรสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสมุนไพรพื้นบ้าน (ขมิ้น และพริกไทย) และกลุ่มสมุนไพรให้สีแดง (กระเจี๊ยบแดง บัทรูป ฝรั่ง และครั่ง) แหนมหมูสูตรพื้นฐานเตรียมโดยผสมเนื้อหมูบด หนังหมูต้ม ข้าวเหนียวหนึ่ง กระเทียม และเกลือในสัดส่วนดังนี้ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) 71, 18, 5, 3.5 และ 2.5 ร่วมกับสารคงสภาพของสี (โซเดียมไนไตรต์) จากนั้นเติมสมุนไพรในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ สมุนไพรสด (5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) น้ำมันสกัดจากสมุนไพร (1 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และสมุนไพรให้สีแดง (2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) แล้วทำการหมักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 0, 1, 3, 5 และ 7 เพื่อตรวจวัดค่าพีเอช ปริมาณกรดแลกติก และจำนวนแบคทีเรียกรดแลกติก เตรียมแหนมหมูสมุนไพร 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 (เติมขมิ้นสด) สูตรที่ 2 (เติมขมิ้นสดร่วมกับบัทรูป) สูตรที่ 3 (เติมพริกไทยสด) และสูตรที่ 4 (เติมพริกไทยสดร่วมกับบัทรูป) เพื่อตรวจสอบคุณภาพโดยเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมซึ่งไม่เติมสมุนไพร ผลการทดลองพบว่าในวันที่ 3 ของการหมัก แหนมที่เติมขมิ้นสดหรือพริกไทยสด 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าพีเอช ≤ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดแลกติก และจำนวนแบคทีเรียกรดแลกติก แหนมที่เติมกระเจี๊ยบแดงหรือบัทรูปก็แสดงค่าพีเอช < 4.6 ในช่วงเวลาเดียวกัน ผลการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พบว่า แหนมหมูทั้ง 4 สูตรมีลักษณะสีชมพูตามธรรมชาติ ปริมาณโปรตีนและไขมันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ค่าพีเอชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การตรวจสอบจุลินทรีย์ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* และ *Clostridium perfringens* ขณะที่ *Salmonella spp.* และ *Escherichia coli* ไม่ตรวจพบในสูตรที่ 1 และ 3 แต่ตรวจพบในสูตรที่ 2 และ 4 (ควรระบุว่าสูตรใดที่ผู้อ่านอ่านแล้วควรนำไปใช้เพราะอะไร ซึ่งส่วนนี้จะทำให้งานมีคุณค่ายิ่งขึ้น)

คำสำคัญ: พืชสมุนไพร, แหนมหมู, คุณสมบัติทางเคมี, จุลินทรีย์, คุณภาพ

Abstract

This study aimed to investigate the effects of medicinal plant additives on the chemical, microbiological, and quality characteristics of fermented pork sausage (Nham). Two groups of herbs were used: traditional herbs (ginger, turmeric, and pepper) and red-coloring herbs (roselle, beetroot, sappanwood, and lac dye). A basic fermented pork sausage formula was prepared by mixing minced pork, boiled pork skin, steamed sticky rice, garlic, and salt at respective proportions of 71%, 18%, 5%, 3.5%, and 2.5% (w/w), along with a color retention agent. Herbs were incorporated in various forms: fresh herbs (5% and 10% w/w), herbal essential oils (1% and 10% w/w), and red-coloring herbs (2.5% w/w). The sausages were fermented at room temperature for 7 days. Samples were collected on days 0, 1, 3, 5, and 7 to determine pH, lactic acid content, and lactic acid bacteria counts. Four formulations of herbal fermented

^{1,3}หลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์

² หลักสูตรอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์

* ผู้ประสานงาน พรทิพพา พิณญาพงษ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์
Email: p.pinyaphong@gmail.com

^{1,3}Program of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Maung, Uttaradit
E-mail: p.pinyaphong@gmail.com

² Program of Food and Nutrition, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Maung, Uttaradit

* Corresponding author: Email: Pornthippa Pinyaphong, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

pork were prepared: Formula 1 (with fresh ginger), Formula 2 (with fresh ginger and beetroot), Formula 3 (with fresh pepper), and Formula 4 (with fresh pepper and beetroot), to evaluate their quality compared to the control formulation without added herbs. The results showed that on day 3 of fermentation, sausages containing 5% fresh ginger or pepper had a pH value ≤ 4.6 , which corresponded with an increase in lactic acid and lactic acid bacteria. Similarly, sausages containing roselle or beetroot also exhibited a pH < 4.6 on day 3. Quality evaluation revealed that all four herbal formulations had a naturally pink color. There were no statistically significant differences in protein and fat content ($p > 0.05$); however, significant differences were observed in pH ($p < 0.05$). Microbiological testing showed no contamination by *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, or *Clostridium perfringens*. Additionally, *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* were not detected in Formulas 1 and 3 but were detected in Formulas 2 and 4.

Keywords: Medicinal plants, Nham (Fermented pork), chemical property, microorganism, quality

บทนำ

แหนมหมูจัดเป็นอาหารแปรรูปพื้นบ้าน ของประชาชนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ผลิตจากการนำเนื้อหมูบดมาผสมกับเกลือป่นสำหรับบริโภค ดินประสิว (โพแทสเซียมไนเตรท) ผงเพร็ก (เกลือและเกลือไนไตรท์) กระเทียม บดละเอียด และข้าวสุก นวดผสมให้เข้ากัน แล้วใส่หนังหมู ต้มหั่นบางๆ ผสมให้เข้ากันอีกครั้ง นำส่วนผสมไปบรรจุในถุงพลาสติก มัดปากถุงให้แน่นเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไป จากนั้นเก็บแหนมไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3-5 วัน เพื่อให้เกิดการหมัก จนผลิตภัณฑ์แหนมมีรสเปรี้ยว (Adams & Moss, 2008) แหนมที่ผสมเสร็จใหม่ๆ จะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.2 – 6.5 เมื่อการหมักดำเนินไปแบคทีเรียกลุ่มแลคติกซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะผลิตกรดแลคติกซึ่งทำให้แหนมมีรสเปรี้ยว แหนมที่หมักจนสมบูรณ์ ค่าพีเอชจะลดลงมาที่ 4.45-4.55 (นรากร & ศนิ, 2564) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. ๑๔๕/๒๕๕๖) กำหนดค่าพีเอชของผลิตภัณฑ์แหนมต้องไม่เกิน 4.6 โดยทั่วไปกระบวนการหมักแหนมเป็นการหมักโดยอาศัยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อยจนไม่สามารถแข่งขันกับเชื้อจุลินทรีย์อื่นๆ ที่ปนเปื้อนได้อย่างเพียงพอ ทำให้การควบคุมกระบวนการหมักทำได้ยาก ไม่มีความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคทางเดินอาหารสามารถเจริญเติบโตได้ (ไฟโรจน์, 2558) จึงจำเป็นต้องใช้ดินประสิวและผงเพร็กช่วยในการหมักเพื่อจะทำให้เนื้อไม่เน่า และหยุดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคทางเดินอาหาร เช่น *Salmonella* spp. และ *Staphylococcus aureus* เป็นต้น นอกจากนี้ดินประสิวยังทำให้แหนมมีเนื้อแน่น เหนียว มีสีแดงสวยน่ารับประทาน อย่างไรก็ตามมาตรฐาน มผช. ๑๔๕/๒๕๕๖ ของแหนมที่ทำจากเนื้อหมู กำหนดว่าการเติมโซเดียมไนเตรทหรือโพแทสเซียมไนไตรท์ต้องไม่เกิน 125 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กรณีที่ใช้ในรูปของผงเพร็กต้องไม่เกิน 2 กรัมต่อเนื้อสัตว์ 1 กิโลกรัม เนื่องจากว่าหากได้รับ

สารไนเตรทไนไตรท์ในปริมาณมากจะทำให้เกิดสารจำพวกไนโตรซามีนซึ่งเป็นสาเหตุของโรคมะเร็งตับ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) สำหรับแหนมที่เกิดการหมักสมบูรณ์แล้ว หากไม่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ แหนมจะเกิดการหมักต่อไปทำให้เกิดความเป็นกรดมากเกินไป ทำให้แหนมมีน้ำไหลออกมาเนื่องจากโปรตีนในเนื้อหมูเสียสภาพ มีการจับกันแน่นขึ้น

สมุนไพรพื้นบ้านมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิดได้ เช่น ขิงเป็นสมุนไพรช่วยลดอาการท้องอืดเฟ้อ และแผลในกระเพาะอาหาร สารสกัดจากขิงสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ 3 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli* *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus subtilis* (Azu & Onyeagba, 2007) ขมิ้นมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา ลดการอักเสบ กระตุ้นการหลั่งน้ำดี ช่วยย่อยอาหาร บรรเทาอาการปวดท้อง ท้องอืด แน่น จุกเสียด และกระตุ้นภูมิคุ้มกัน สารสกัดจากขมิ้นยังมีผลยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคทางเดินอาหารได้เช่นเดียวกัน (*Salmonella* sp., *Shigella* sp. และ *E. coli*) (Ungphaiboon et al., 2005) พริกไทยสดช่วยขับลมในกระเพาะ ขับเหงื่อแก้ท้องอืด ช่วยให้ระบบย่อยอาหารทำงานดีขึ้น และคลายอาการจากอาหารเป็นพิษ สารสกัดจากพริกไทยมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *B. subtilis* (Shiva et al., 2013) จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำสมุนไพรพื้นบ้านดังกล่าวข้างต้นมาเติมเป็นส่วนผสมในการหมักแหนมหมูเพื่อช่วยในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหาร และเพิ่มกลิ่นของสมุนไพรในแหนม ซึ่งอาจจะเป็นแนวทางในการลดปริมาณการใช้ดินประสิวและผงเพร็กในการผลิตแหนมหมูได้ นอกจากนี้สมุนไพรบางชนิดนิยมนำมาใช้ผสมกับอาหารเพื่อให้สีแดง โดยธรรมชาติและเป็นการเพิ่มสรรพคุณทางยา เช่น กระเจี๊ยบ (Roselle) บีทรูท (Beetroot) ฝาง (Sappanwood) และครั่ง (Lac dye) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้านเซลล์มะเร็ง ช่วยให้เลือดไหลเวียนสะดวก เป็นต้น (Avirutnant & Pongpan, 1983; Jimtaisong et al., 2013; Sirotamarat, 2005)

จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการนำมาผสมในแฮมหมูเพื่อลดปริมาณดินประสิวและผงเพรกที่ใช้ในการหมักแฮม ดังนั้นการวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเติมสมุนไพรพื้นบ้านและสมุนไพรให้สีแดงในกระบวนการผลิตแฮมหมูต่อคุณสมบัติทางเคมี จุลินทรีย์ และคุณภาพของแฮมหมู

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

การเตรียมสมุนไพรพื้นบ้าน

สมุนไพรพื้นบ้านที่ใช้ได้แก่ ขิงสด ขมิ้นสด และพริกไทยสด ซื้อจากตลาดสดเทศบาล 2 จังหวัดอุดรธานีเตรียมโดยนำขิงสด และขมิ้นสดมาล้าง และปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ลักษณะคล้ายลูกเต๋าวัดขนาดประมาณ 5×5×5 มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) แช่น้ำเกลือเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 15 นาที นำขึ้นมาพักไว้ให้แห้ง ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปสำหรับพริกไทยสด แยกออกจากพวงให้เป็นเม็ดเดี่ยวๆ นำไปล้างน้ำ แล้วแช่น้ำเกลือเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 15 นาที นำขึ้นมาพักไว้ให้แห้ง ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปสำหรับน้ำมันขิงสกัดเกรดอาหารซื้อจากบริษัทที่ซีเอสแปซิฟิค จำกัด กรุงเทพฯ น้ำมันขมิ้นเกรดอาหารซื้อจากบริษัทเอที

ออปเปอร์เรชั่นส์จำกัด ชลบุรี และน้ำมันพริกไทยเกรดอาหารซื้อจากบริษัทที่ซีเอสแปซิฟิค จำกัด กรุงเทพฯ

สมุนไพรที่ให้สีแดง ได้แก่ ผงกระเจียวแดง ผงบีทรูท ผงแก่นฝาง และผงครั่ง ซื้อจากร้านบ้านปลายนา นครปฐม ร้านชวนชมเบเกอรี่ กรุงเทพฯ ร้านจักรวรรดิสมุนไพร กรุงเทพฯ และบริษัทนอร์ทเทิร์นสยามซีตแลค จำกัด ลำปาง ตามลำดับ

การผลิตแฮมหมู

การผลิตแฮมหมูมีการเตรียมวัตถุดิบดังนี้ (ไพโรจน์, 2558) นำเนื้อหมูแดงบดไขมันไปเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียส เพื่อรอการผลิต ส่วนของหนังหมูเลาะเอาส่วนไขมันหมูออก เหลือเฉพาะส่วนหนังหมูบางๆ นำมาต้มในน้ำเดือด จากนั้นหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 0.5 x 4 เซนติเมตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเพื่อรอการผลิต นำข้าวเหนียวหนึ่งมาล้างด้วยน้ำสะอาดจนเม็ดข้าวร่วนแล้วผึ่งให้แห้งรอการผลิต จากนั้นทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ตาม Table 1 ผสมให้เข้ากัน นวดจนส่วนผสมทั้งหมดเหนียวเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

Table 1 Ingredients for 1 kg of fermented pork.

Ingredients	Quantity (g)
Minced pork without fat	800
Boiled pork skin without fat	200
Steamed sticky rice	60
Sodium chloride	30
Sodium nitrate	0.3
Sodium nitrite	0.2
Sodium tripolyphosphate	3
Sodium erythrobate	0.5
Finely crushed fresh garlic	40

การศึกษาผลของสมุนไพรพื้นบ้านต่อคุณสมบัติทางเคมีและจุลินทรีย์ของแฮมหมู

เตรียมแฮมหมูใส่ซามผสมสแตนเลส 4 ใบๆ ละ 1 กิโลกรัม เติมขิงสด ขมิ้นสด และพริกไทยสด อย่างละ 50 กรัม ลงในซามผสมสแตนเลสใบที่ 1 ใบที่ 2 และใบที่ 3 ตามลำดับ ใบที่ 4 ไม่เติมสมุนไพร (ชุดควบคุม) นวดผสมให้เข้ากันนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติก ถุงละ 30 กรัม รีดถุงพลาสติกเพื่อไล่อากาศออก มัดถุงพลาสติกให้แน่นด้วยหนังยาง นำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27-32 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 วัน เก็บตัวอย่างแฮม 5 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 เริ่มต้น (0 วัน) ครั้งที่ 2-5 เก็บในวันที่ 1, 3, 5 และ 7 ของการหมักตามลำดับ เก็บ

ครั้งละ 3 ถุง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ปริมาณกรดแลคติก และจำนวนแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกทั้งหมด ในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง

ทำการทดลองซ้ำดังกล่าวข้างต้นแต่เปลี่ยนแปลงปริมาณของขิงสด ขมิ้นสด และพริกไทยสด เป็น 100 กรัม สำหรับการศึกษาค้นคว้าสมุนไพรพื้นบ้านในรูปแบบของน้ำมันสกัดจะเติมน้ำมันขิง น้ำมันขมิ้น และน้ำมันพริกไทย อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในซามผสมสแตนเลสใบที่ 1 ใบที่ 2 และใบที่ 3 แทนการเติมสมุนไพรสด ตามลำดับ ทำการทดลองซ้ำดังกล่าวข้างต้นโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำมันขิง น้ำมันขมิ้น และน้ำมันพริกไทย เป็น 100 มิลลิลิตร

การศึกษาผลของสมุนไพรให้สีแดงต่อคุณสมบัติทางเคมีของแหนมหมู

การศึกษานี้เป็นการทดลองใช้สมุนไพรให้สีแดงบางชนิดแทนการเติมสารดินประสีและผงเพรก โดยผสมองค์ประกอบต่างๆ ในการหมักแหนมหมูตาม Table 1 แต่ไม่เติมโซเดียมไนเตรท โซเดียมไนไตรท์ โซเดียมไตรฟอสเฟต และโซเดียมอีริทโรเบต พักไว้ในซามผสมสแตนเลสจำนวน 5 ใบๆ ละ 1 กิโลกรัม ใบที่ 1 ไม่เติมสมุนไพรให้สีแดง (ชุดควบคุม) ใบที่ 2 ถึง ใบที่ 5 เติมผงกระเจี๊ยบแดง ผงบีทรูท ผงแก่นฝาง และผงครั่ง อย่างละ 25 กรัม ตามลำดับ จากนั้นนวดผสมให้เข้ากันแล้วบรรจุใส่ถุงพลาสติก ถุงละ 30 กรัม หมักเป็นเวลา 7 วัน เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าพีเอช และปริมาณกรด เป็นช่วงๆ ในวันที่ 0, 1, 3, 5 และ 7 ของการหมัก โดยในแต่ละครั้งที่เก็บตัวอย่างทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง

การผลิตแหนมหมูสูตรผสมพืชสมุนไพร

เตรียมแหนมหมูผสมสมุนไพร 4 สูตร ตามส่วนผสมใน Table 2 โดยสูตร 1 (ผสมขิงสด) สูตร 2 (ผสมขิงสดและผงบีทรูท) สูตร 3 (ผสมพริกไทยสด) และสูตร 4 (ผสมพริกไทยสดและผงบีทรูท) นวดส่วนผสมแต่ละสูตรให้เข้ากันจนมีความเหนียว บรรจุใส่ถุงพลาสติก ถุงละ 50 กรัม รีดถุงให้อากาศออก มัดถุงพลาสติกให้แน่นด้วยหนังยาง นำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพตาม มพช. ๑๔๕/๒๕๔๖ ได้แก่ ลักษณะทั่วไป ลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่น รส สิ่งแปลกปลอม โปรตีน (AOAC, 2000) ไขมัน (AOAC, 2000) ค่าพีเอช (pH meter) และเชื้อปนเปื้อนชนิดต่างๆ ได้แก่ *Salmonella* spp. ซึ่งตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO 6579:2002 (International Organization for Standardization, 2002), *S. aureus* (AOAC, 2003), *B. cereus* (BAM Online, 2002), *Clostridium perfringens* (BAM Online, 2002) และ *E. coli* (BAM Online, 2002)

Table 2 Ingredients of herbal fermented pork 1 kg.

Ingredients	Quantity (g)			
	Formula 1	Formula 2	Formula 3	Formula 4
Minced pork	800	800	800	800
Boiled pork skin	200	200	200	200
Steamed sticky rice	60	60	60	60
Sodium chloride	30	30	30	30
Sodium nitrate	0.3	-	0.3	-
Sodium nitrite	0.2	-	0.2	-
Sodium tripolyphosphate	3.0	-	3.0	-
Sodium erythrobate	0.5	-	0.5	-
Crushed fresh garlic	40	40	40	40
Fresh ginger	50	50	-	-
Fresh pepper	-	-	50	50
Beetroot powder	-	25	-	25

การตรวจสอบค่าพีเอชของแหนม

เตรียมสารละลายตัวอย่างแหนมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้ (AOAC, 2000) ซึ่งตัวอย่างแหนม 10 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร บดให้ละเอียดด้วยแท่งแก้วคน เติมน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 90 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วคนประมาณ 1 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 1 ปิเปตส่วนของสารละลายใส 20 มิลลิลิตร มาวัดค่าพีเอช โดยใช้ pH meter ทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง

การวิเคราะห์ปริมาณกรด

ปิเปตสารละลายใสของแหนม 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ 1-2 หยด นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู (AOAC, 2000) นำไปคำนวณปริมาณกรดแลคติก ดังสมการ (1)

ปริมาณกรดแลคติก =

$$(N \times V_1 \times 90.08 \times 100) / 1,000 \times V_2 \quad \text{สมการ (1)}$$

เมื่อ

N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)

V₁ = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

V₂ = ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

การวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก

ซึ่งตัวอย่างแฮม 10 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ปริมาตร 90 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วคน ปิเปตสารละลายตัวอย่างแฮม 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายเข้มข้น 10⁻¹) จากนั้นปิเปตสารละลายที่เข้มข้น 10⁻¹ อีก 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายเข้มข้น 10⁻²) จากนั้นทำการเจือจางต่อไปจนได้ความเข้มข้น 10⁻¹⁰ ปิเปตสารละลายของแต่ละระดับการเจือจาง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปในจานเพาะเชื้อ (แต่ละการเจือจางทำซ้ำ 2 ครั้ง) เทอาหารแข็งสูตร MRS ที่เติม bromocresol purple 0.01 เปอร์เซ็นต์ (อุณหภูมิ 45±1 องศาเซลเซียส) ประมาณ 12-15 มิลลิลิตร ลงไปในจานเพาะเชื้อแต่ละใบ หมุนจานเพาะเชื้อซ้าย ขวา บน ล่าง เพื่อให้สารละลายตัวอย่างและอาหารเข้ากัน ตั้งไว้จนอาหารแข็ง นำไปป่นในขวดโหลแก้วสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 37±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48±2 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีที่เจริญเติบโตและสามารถเปลี่ยนอาหารจากสีม่วงเป็นสีเหลือง (AOAC, 2000) แล้วนำไปคำนวณในหน่วยโคโลนีต่อกรัม หรือ colony forming unit (CFU/g) ดังสมการ (2)

$$CFU/g = \sum c / (v_1 n_1 + 0.1 n_2) d \quad \text{สมการ (2)}$$

เมื่อ

Σc = ผลรวมของโคโลนีที่นับได้ทั้งหมดจากจานเพาะเชื้อที่นับได้ในช่วง 25-250 โคโลนี

V₁ = ปริมาณของหัวเชื้อที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์

n₁ = จำนวนจานเพาะเชื้อที่นับในช่วง 25-250 โคโลนี ในระดับความเข้มข้นแรก

n₂ = จำนวนจานเพาะเชื้อที่นับในช่วง 25-250 โคโลนี ในระดับความเข้มข้นที่ 2

d = ระดับความเข้มข้นแรกที่สามารถนับเชื้อได้ในช่วง 25-250 โคโลนี

การวัดคุณภาพของแฮมหมู

วิเคราะห์คุณภาพของแฮมหมู ได้แก่ ลักษณะทั่วไป ลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่นรส สิ่งแปลกปลอม ทำการตรวจพินิจตาม มพช. ๑๔๕/๒๕๕๕ ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000) และปริมาณไขมัน (AOAC, 2000)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษาผลของสมุนไพรพื้นบ้าน และการศึกษาผลของสมุนไพรให้สีแดง วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าพีเอช ปริมาณกรด และจำนวนแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกที่ตรวจพบในตัวอย่างที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับการศึกษาคุณภาพของแฮมหมูสูตรต่างๆ นำข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง มาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) และหาความแตกต่างรายคู่ของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey HSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p≤0.05) โดยใช้โปรแกรมอะไรระบุเพิ่มเติมด้วย

ผลการทดลองและอภิปรายผล

คุณสมบัติทางเคมี และจำนวนจุลินทรีย์แลคติกของแฮมหมูที่เติมสมุนไพรพื้นบ้าน

จากการเติมสมุนไพรชนิดต่างๆ ได้แก่ ขิง ขมิ้น และพริกไทย ในลักษณะสด และน้ำมัน ลงในตัวอย่างแฮมหมู เพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกสมุนไพรพื้นบ้านที่เหมาะสมในการนำมาผสมกับตัวอย่างแฮม ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ปริมาณกรดแลคติก และจำนวนแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกของตัวอย่างแฮมหมูที่เติมสมุนไพรสดชนิดต่างๆ และตัวอย่างแฮมหมูที่เติมน้ำมันสมุนไพรชนิดต่างๆ แสดงใน Table 3-5 ตามลำดับ

Table 3 pH values of fermented pork supplemented with fresh and oil medicinal plants during different incubation periods.

Formulars	Average pH value by day				
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 5	Day 7
control	6.20±0.06	5.80±0.06	4.80±0.05	4.30±0.05	4.20±0.05
5% ginger added	6.27±0.05	5.15±0.05	4.60±0.05	4.10±0.05	4.00±0.06
10% ginger added	6.21±0.06	5.81±0.06	4.81±0.06	4.31±0.06	4.30±0.06
5% turmeric added	6.25±0.05	5.85±0.07	4.85±0.06	4.35±0.06	4.05±0.05
10% turmeric added	6.50±0.07	6.10±0.06	5.10±0.06	4.60±0.06	4.10±0.07
5% pepper added	6.28±0.05	5.58±0.05	4.58±0.05	4.28±0.05	4.20±0.07
10% pepper added	6.33±0.06	5.83±0.06	5.33±0.05	4.83±0.06	4.33±0.05
1% ginger oil added	6.27±0.06	5.87±0.08	4.87±0.07	4.47±0.05	4.07±0.05
10% ginger oil added	6.20±0.05	5.80±0.07	4.80±0.06	4.40±0.05	4.04±0.05
1% turmeric oil added	6.25±0.04	5.75±0.06	4.75±0.05	4.25±0.05	4.20±0.07
10% turmeric oil added	6.38±0.05	5.98±0.07	5.48±0.06	4.98±0.06	4.48±0.07
1% pepper oil added	6.36±0.06	5.96±0.05	4.96±0.05	4.46±0.05	4.30±0.06
10% pepper oil added	6.40±0.06	6.00±0.06	5.00±0.06	4.50±0.05	4.40±0.06

จาก Table 3 เมื่อเริ่มต้นการหมัก แหนมหมูที่เติมสมุนไพรชนิดต่างๆ มีค่าพีเอชเฉลี่ยประมาณ 6.20-6.50 มีปริมาณกรดเฉลี่ยประมาณ 0.20-0.26 เปอร์เซ็นต์ และมีจำนวนแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกประมาณ 5.72-6.02 log CFU/g เมื่อเวลาในการหมักเพิ่มขึ้น จากเริ่มต้นจนถึงวันที่ 7 ของการหมัก ค่าพีเอชของแหนมในสูตรควบคุมและสูตรที่เติมสมุนไพรลดลงและสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรด และจำนวนของแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก ซึ่งอธิบายได้ว่าการหมักเกิดขึ้นจุลินทรีย์ที่อยู่ในวัตถุดิบตามธรรมชาติจะผลิตกรดแลคติก ซึ่งส่งผลให้แหนมมีรสชาติเปรี้ยว โดยแสดงค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 4.50-5.30 ส่วนค่าพีเอชที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน มผช คือ ค่าพีเอช ≤ 4.6 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

จากผลการทดลองพบว่าแหนมที่มีค่าพีเอช ≤ 4.6 ภายในเวลา 3 วัน ได้แก่ แหนมหมูที่เติมขิงสด 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตรเติมพริกไทยอ่อน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยแสดงค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.39 และ 0.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีจำนวน

จุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติกประมาณ 7.8-7.82 log CFU/กรัม เมื่อเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นเป็น 5 วัน พบตัวอย่างแหนมหมูที่มีค่าพีเอช ≤ 4.6 เพิ่มขึ้นเกือบทุกสูตร ยกเว้น 2 สูตร ได้แก่ สูตรเติมพริกไทยสด 10 เปอร์เซ็นต์ (pH = 4.83) และสูตรเติมน้ำมันขมิ้น 10 เปอร์เซ็นต์ (pH = 4.98) โดยมีค่าความเป็นกรดประมาณ 0.37-0.39 เปอร์เซ็นต์ และมีจำนวนจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติกทั้งหมดประมาณ 7.37-7.52 log CFU/กรัม จะเห็นได้ว่าการเติมสมุนไพรพื้นบ้าน 2 ชนิด คือ ขิงสด 5 เปอร์เซ็นต์ และ พริกไทยสด 5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการหมักได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแหนมหมูสูตรควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชของแหนมผสมสมุนไพรชนิดต่างๆ ได้แก่ พริก ใบมะกรูด หอมแดง ขิง และขมิ้นขาวที่หมักเป็นเวลา 7 วัน จะมีค่าพีเอชประมาณ 4.15-4.21 (สุชาติและคณะ, 2550) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกขิงสด 5 เปอร์เซ็นต์ และ พริกไทยสด 5 เปอร์เซ็นต์ มาผสมกับแหนมหมูเพื่อให้แหนมมีรสชาติเปรี้ยวภายในเวลา 3 วัน

Table 4 Acidity values of fermented pork supplemented with fresh and oil medicinal plants during different incubation periods.

Formulars	Average pH value by day				
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 5	Day 7
control	6.20±0.06	5.80±0.06	4.80±0.05	4.30±0.05	4.20±0.05
5% ginger added	6.27±0.05	5.15±0.05	4.60±0.05	4.10±0.05	4.00±0.06
10% ginger added	6.21±0.06	5.81±0.06	4.81±0.06	4.31±0.06	4.30±0.06
5% turmeric added	6.25±0.05	5.85±0.07	4.85±0.06	4.35±0.06	4.05±0.05
10% turmeric added	6.50±0.07	6.10±0.06	5.10±0.06	4.60±0.06	4.10±0.07
5% pepper added	6.28±0.05	5.58±0.05	4.58±0.05	4.28±0.05	4.20±0.07
10% pepper added	6.33±0.06	5.83±0.06	5.33±0.05	4.83±0.06	4.33±0.05
1% ginger oil added	6.27±0.06	5.87±0.08	4.87±0.07	4.47±0.05	4.07±0.05
10% ginger oil added	6.20±0.05	5.80±0.07	4.80±0.06	4.40±0.05	4.04±0.05
1% turmeric oil added	6.25±0.04	5.75±0.06	4.75±0.05	4.25±0.05	4.20±0.07
10% turmeric oil added	6.38±0.05	5.98±0.07	5.48±0.06	4.98±0.06	4.48±0.07
1% pepper oil added	6.36±0.06	5.96±0.05	4.96±0.05	4.46±0.05	4.30±0.06
10% pepper oil added	6.40±0.06	6.00±0.06	5.00±0.06	4.50±0.05	4.40±0.06

Table 5 Lactic acid bacteria values of fermented pork supplemented with fresh and oil medicinal plants during different incubation periods.

Formulars	Average lactic acid bacteria value by day (log CFU/g)				
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 5	Day 7
control	6.02±0.06	6.83±0.06	7.60±0.05	8.05±0.05	8.46±0.05
5% ginger added	6.00±0.05	7.48±0.05	7.80±0.05	8.25±0.05	8.66±0.06
10% ginger added	6.01±0.06	6.82±0.06	7.59±0.06	8.04±0.06	8.56±0.06
5% turmeric added	5.97±0.05	6.78±0.07	7.55±0.06	8.00±0.06	8.61±0.05
10% turmeric added	5.72±0.07	6.53±0.06	7.30±0.06	7.75±0.06	8.56±0.07
5% pepper added	5.94±0.05	7.05±0.05	7.82±0.05	8.07±0.05	8.46±0.07
10% pepper added	5.89±0.06	6.80±0.06	7.07±0.05	7.52±0.06	8.33±0.05
1% ginger oil added	5.95±0.06	6.76±0.08	7.53±0.07	7.88±0.05	8.59±0.05
10% ginger oil added	6.03±0.05	6.84±0.07	7.70±0.06	7.95±0.05	8.62±0.05
1% turmeric oil added	5.97±0.04	6.88±0.06	7.65±0.05	8.10±0.05	8.47±0.07
10% turmeric oil added	5.84±0.05	6.65±0.07	6.92±0.06	7.37±0.06	8.18±0.07
1% pepper oil added	5.86±0.06	6.67±0.05	7.44±0.05	7.89±0.05	8.36±0.06
10% pepper oil added	5.82±0.06	6.63±0.06	7.40±0.06	7.85±0.05	8.26±0.06

คุณสมบัติทางเคมีของแฮมหมักที่เติมสมุนไพรให้สีแดง จากการทดลองหมักแฮมหมักโดยเติมสมุนไพรให้สีแดงแบบผงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กระเจี๊ยบแดง บัทรูป ฝรั่ง และ ครั้ง แทนการเติมสารกลุ่มไนโตรเจนไนไตรท์ (โซเดียมไนไตรท์

โซเดียมไนไตรท์ โซเดียมพอลิฟอสเฟต และโซเดียมอิทธิโรเบต) เปรียบเทียบกับแฮมหมักสูตรควบคุมที่ไม่เติมสมุนไพรให้สีแดง ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช และปริมาณกรดของแฮมหมัก แสดง ใน Table 6 และ Table 7 ตามลำดับ

Table 6 pH values of fermented pork supplemented with red medicinal plants during different incubation periods.

Formulars	Average pH value by day				
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 5	Day 7
Control	6.20±0.01	5.80±0.01	4.80±0.02	4.30±0.01	4.20±0.01
2.5% roselle added	5.64±0.02	4.79±0.01	4.19±0.01	4.07±0.02	4.04±0.02
2.5% beetroot added	5.61±0.01	4.70±0.01	4.40±0.02	4.03±0.01	4.03±0.01
2.5% sappanwood added	5.80±0.03	5.40±0.02	4.75±0.02	4.65±0.01	4.60±0.02
2.5% lac dye added	5.88±0.01	5.42±0.01	4.67±0.02	4.50±0.02	4.30±0.02

Table 7 Acidity values of fermented pork supplemented with red medicinal plants during different incubation periods.

Formulars	Average acidity value by day (%)				
	Day 0	Day 1	Day 3	Day 5	Day 7
Control	0.20±0.01	0.24±0.01	0.32±0.02	0.40±0.02	0.52±0.03
2.5% roselle added	0.30±0.02	0.42±0.02	0.61±0.03	0.69±0.02	0.72±0.02
2.5% beetroot added	0.31±0.01	0.48±0.01	0.53±0.02	0.73±0.02	0.73±0.01
2.5% sappanwood added	0.29±0.02	0.34±0.02	0.45±0.02	0.48±0.01	4.50±0.02
2.5% lac dye added	0.25±0.02	0.36±0.02	0.48±0.01	0.54±0.02	0.59±0.02

จาก Table 6 จะเห็นได้ว่าเวลาเริ่มต้นการหมัก (0 วัน) ค่าพีเอชของแฮมหมักที่ผสมสมุนไพรให้สีแดงทุกชนิด มีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.61-6.11 ซึ่งน้อยกว่าค่าพีเอชของสูตรควบคุม เมื่อเวลาของการหมักเพิ่มขึ้นค่าพีเอชของแฮมหมักที่ผสมสมุนไพรให้สีแดงและแฮมหมักสูตรควบคุมมีค่าลดลง ในวันที่ 3 ของการหมักมีแฮมหมักเพียงสองสูตรที่แสดงค่าพีเอช ≤ 4.6 คือ แฮมหมักที่ผสมกระเจี๊ยบแดง และแฮมหมักที่ผสม บัทรูป ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 0.53 และ 0.61 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 7) ส่วนในวันที่ 5 ของการหมัก แฮมหมักที่ผสมสมุนไพรให้สีแดงแสดงค่าพีเอชน้อยกว่า 4.6 ยกเว้นแฮมหมักที่ผสมฝรั่งที่แสดงค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 4.65 ซึ่งในวันที่ 7 ของการหมัก แฮมหมักที่ผสมสมุนไพรให้สีแดงทุกชนิดแสดงค่าพีเอชเฉลี่ย ≤ 4.6 ดังนั้นหากพิจารณาจากค่าพีเอชของแฮมหมัก พบว่า กระเจี๊ยบแดงและบัทรูปเป็นสมุนไพรที่เหมาะสมในการนำไปผสมกับผลิตภัณฑ์แฮมหมักเพื่อให้มีสีแดงจากสารธรรมชาติแทนการใช้สารไนโตรเจนไนไตรท์เนื่องจากให้ค่าพีเอช ≤ 4.6 ตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก จะทำให้แฮมมีรสชาติเปรี้ยวเร็วกว่าสมุนไพรชนิด

อื่น แต่อย่างไรก็ตามกระเจี๊ยบแดงมีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์แฮมหมักเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการหมัก คือ ในวันแรกสีของแฮมหมักจะเป็นสีม่วงแดง แล้วจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพูในวันที่ 3 และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอีกครั้งหนึ่งในวันที่ 7 ซึ่งอธิบายได้ว่ากระเจี๊ยบแดงมีสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีโดยธรรมชาติและมีสมบัติเปลี่ยนแปลงสีตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป หากอยู่ในสภาวะกรดจะให้สีแดง หากอยู่ในสภาวะเป็นกลางจะให้สีม่วง และหากอยู่ในสภาวะเป็นเบสจะให้สีน้ำเงิน (Sayago-Ayerdi *et al.*, 2007) ดังนั้นจึงเลือกบัทรูปเป็นสมุนไพรที่ให้สีแดงแทนไนโตรเจนไนไตรท์ในการทดลองต่อไป

คุณภาพของแฮมหมักผสมสมุนไพร

จากการทดลองผลิตแฮมหมักผสมสมุนไพร 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 แฮมหมักผสมขิงสด 5% สูตรที่ 2 แฮมหมักผสมขิงสด 5% และบัทรูป 2.5% สูตรที่ 3 แฮมหมักผสมพริกไทยสด 5% และ สูตรที่ 4 แฮมหมักผสมพริกไทยสด 5% และบัทรูป 2.5% ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ เปรียบเทียบกับสูตรเดิมที่ไม่เติมสมุนไพร (สูตรที่ 5)

หลังจากการหมักไปแล้ว 3 วัน ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแฮม พบว่า แฮมทั้ง 5 สูตร มีลักษณะเนื้อแน่น ไม่มีโพรงอากาศ และมีสีชมพูตามธรรมชาติ โดยสูตรที่ 1 และ 5 มีกลิ่นหอมธรรมชาติ สูตรที่ 2 มีกลิ่นคล้ายดิน สูตรที่ 3 และ 4 ได้กลิ่นของพริกไทย ทุกสูตรไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติทางเคมี เช่น ค่าพีเอช ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันของแฮมทั้ง 5 สูตร โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว แสดงใน Table 8 พบว่าค่าพีเอชระหว่างสูตรต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสูตรที่มีค่าพีเอชต่ำสุด คือ สูตรที่ 1 รองลงมาคือสูตรที่ 3 และแฮมสูตรที่เติมสมุนไพรทั้งขิงกับขมิ้น (สูตรที่ 2 และสูตรที่ 4) ในขณะที่สูตรที่ 5 ซึ่งเป็นสูตรควบคุมไม่เติมสมุนไพรใดๆ มีค่าพีเอชสูงที่สุด แนวโน้มของค่าพีเอชที่ลดลงของแฮมสูตรเติมสมุนไพร อาจเนื่องมาจากผลของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสมุนไพร เช่น ขิงซึ่งมีสารจินเจอร์อล (Gingerols) และโชกาออล (Shogaols) ที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ที่ติดมากับวัตถุดิบและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ ส่งผลให้การหมักของแบคทีเรียกรดแลกติกมีประสิทธิภาพดีขึ้น และผลิตกรดแลกติกได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าพีเอชของแฮมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับสูตรเดิมที่ไม่เติมสมุนไพร (Mao *et al.*, 2019) สำหรับพริกไทย

มีสารพิเพอรีน (Piperine) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์บางชนิดเช่นกัน แต่จะมีผลทำให้ค่าพีเอชลดลงไม่เท่ากัน โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 3 เดิมพริกไทยอย่างเดียว กับสูตรที่ 1 เดิมขิงอย่างเดียว พบว่าค่าพีเอชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Table 9) ส่วนการเติมขมิ้นรวมกับขิงในสูตรที่ 2 ส่งผลให้ค่าพีเอชสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรที่เติมขิงเพียงอย่างเดียว (สูตรที่ 1) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สำหรับการเติมขมิ้นรวมกับพริกไทยในสูตรที่ 4 ค่าพีเอชที่วัดได้ไม่แตกต่างจากสูตรที่ 3 ที่เติมพริกไทยเพียงอย่างเดียว ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Janiszewska-Turak และคณะ (2022) ได้ทำการหมักน้ำขมิ้นโดยเชื้อธรรมชาติพบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำขมิ้นมีค่าประมาณ 5.8 เมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ค่า pH ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงวันที่ 6 ของการหมัก ค่าพีเอชจะลดลงมีค่าประมาณ 5.0-5.1 เมื่อเทียบกับน้ำผลไม้เริ่มต้น อย่างไรก็ตามค่าพีเอชที่สูงขึ้นจากการเติมขมิ้นรวมกับสมุนไพรทั้งขิงหรือ พริกไทย ในผลิตภัณฑ์แฮมสามารถปรับสภาวะการหมักในผลิตภัณฑ์แฮมหมักให้เกิดกรดได้เร็วขึ้นจึงทำให้ค่าพีเอชของแฮมลดลงมากกว่าแฮมที่ไม่เติมสมุนไพร ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนบางชนิดได้

Table 8 One-way ANOVA compares means between formulas

Properties	Formula	Mean	Std.	p-value
pH	1	4.17	0.03	0.000
	2	4.53	0.02	
	3	4.59	0.02	
	4	4.52	0.03	
	5	4.76	0.04	
Protein	1	23.31	0.33	0.685
	2	23.21	0.20	
	3	23.03	0.08	
	4	23.03	0.03	
	5	23.03	0.53	
Fat	1	8.15	0.05	0.616
	2	8.21	0.03	
	3	8.20	0.04	
	4	8.20	0.05	
	5	8.22	0.08	

Formulas 1–4 represent different herbal supplement combinations: Formula 1 was supplemented with 5% fresh ginger; Formula 2 with 5% fresh ginger and 2.5% beetroot; Formula 3 with 5% fresh pepper; and Formula 4 with 5% fresh pepper and 2.5% beetroot. Formula 5 was the control formulation that contained no herbal additions.

นอกจากนี้การเติมขิง พริกไทย หรือบีทรูทในปริมาณที่ทำการทดลองไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน และไขมันในผลิตภัณฑ์แฮมหมูอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากการผลิตแฮมใช้วัตถุดิบหลัก เช่น เนื้อหมู และหนังหมูซึ่งเป็นแหล่งของโปรตีนและไขมันในผลิตภัณฑ์ โดยใช้สัดส่วนเดียวกันในทุกสูตร ถึงแม้จะเติมสมุนไพรลงไป สัดส่วนนี้ยังคงใกล้เคียงกัน

ในแต่ละสูตร ซึ่งปริมาณโปรตีนในทุกสูตรเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช ๑๔๕/๒๕๔๖ (โปรตีน ≥ 20 เปอร์เซ็นต์) ส่วนปริมาณไขมันในทุกสูตรมีค่าเฉลี่ยรวม 8.195 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเพียงเล็กน้อย (เกณฑ์ของไขมัน ≤ 8 เปอร์เซ็นต์)

Table 9 Post hoc by Tukey HSD

Item	Compare formular	Mean differences	95% CI	p-value
pH	1-2	-.36000	-.4388 — -.2812	0.000
	1-3	-.41667	-.4955 — -.3379	0.000
	1-4	-.34667	-.4255 — -.2679	0.000
	1-5	-.58667	-.6655 — -.5079	0.000
	2-3	-.05667	-.1355 — -.0221	0.202
	2-4	.01333	-.0656 — -.0921	0.979
	2-5	-.22667	-.3055 — -.1479	0.000
	3-4	.07000	-.0088 — -.1488	0.088
	3-5	-.17000	-.2488 — -.0912	0.000
	4-5	-.24000	-.3188 — -.1612	0.000

สำหรับผลการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาพบว่า แหนมทั้ง 5 สูตรตรวจไม่พบเชื้อ *S. aureus*, *B. cereus* และ *Cl. perfringens* ในส่วนของเชื้อ *Salmonella* sp. จะตรวจพบเฉพาะในสูตรที่ 2 และ 4 เท่านั้น สำหรับเชื้อ *E. coli* ในสูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 ตรวจพบในปริมาณ <3 MPN/g ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ของมผช ๑๔๕/๒๕๔๖ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน แต่ในสูตรที่ 2, สูตรที่ 4 และ สูตรที่ 5 ตรวจพบ $>1,100$ MPN/g แม้จะมีการใช้สมุนไพรในสูตรที่ 2 และ 4 แต่ไม่สามารถยับยั้งเชื้อ *Salmonella* และ *E. coli* ได้ ควรมีการควบคุมการปนเปื้อนเพิ่มเติมจากแหล่งวัตถุดิบ และสภาวะแวดล้อมหรือสุขลักษณะในกระบวนการผลิต (Gelinski *et al.*, 2019) จากข้อมูลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติทางจุลชีววิทยา แหนมหมูสมุนไพรสูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 เหมาะสำหรับการนำไปบริโภคมากที่สุด เนื่องจากมีค่าพีเอช ต่ำกว่า 4.6 และไม่พบเชื้อก่อโรคทางเดินอาหารที่อาจติดมากับวัตถุดิบซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (Osiriphun *et al.*, 2004)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้สมุนไพรพื้นบ้าน ได้แก่ ขิง ขมิ้น และพริกไทย ในรูปแบบสมุนไพรสดและน้ำมัน

สมุนไพร ผสมในผลิตภัณฑ์แฮมหมู พบว่า การเติมขิงสดและพริกไทยสดในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีผลช่วยลดค่าพีเอชของแฮมหมูได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถทำให้ค่าพีเอชลดลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ภายในระยะเวลา 3 วัน สำหรับการเติมผงบีทรูท ซึ่งเป็นสมุนไพรที่ให้สีแดง เพื่อใช้แทนการเติมไนเตรตหรือไนไตรต์ พบว่าไม่สามารถยับยั้งหรือกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่อาจปนเปื้อนมากับวัตถุดิบในการผลิตแฮมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแฮมสมุนไพร ควรมีการศึกษาต่อยอดโดยการเติมเชื้อบริสุทธิ์เริ่มต้น (starter culture) ร่วมกับการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีความถูกต้องตามหลักสุขอนามัย ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่อาจช่วยลดการใช้สารไนเตรตและไนไตรต์ในกระบวนการผลิตแฮมหมูในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม สำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม แห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2560 ภายใต้โครงการ Talent Mobility

เอกสารอ้างอิง

- สุชาติ ไชยสวัสดิ์, อรวี ดีรัมย์, สุรัชย์ แก้วบุญเรือง, ภาณุ พลายนัว, จุฑาทิพย์ พนาปิยะสกุลไชย, อรพรรณ นาสะ กาด, และ ทศนีย์ มหาอด. (2550). *การศึกษาฤทธิ์ยับยั้ง เชื้อก่อโรคอาหารเป็นพิษในหมกโดยใช้สมุนไพรในครัวเรือน*. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ 1219/2547 เรื่องหมก*. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- ไพโรจน์ วิริยจารี. (2558). *เทคโนโลยีเชื้อบริสุทธิ์ในอุตสาหกรรม เนื้อสัตว์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). โอเดียนสโตร์.
- นรากร ศรีสุข และ ศนิ จิระสถิตย์. (2564). ผลิตภัณฑ์หมกหมู ที่ผลิตโดยภูมิปัญญาชาวบ้าน จังหวัดฉะเชิงเทรา และ ผลการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ระหว่างการหมก. *วารสารราชชนก*, 18(2), 23–28.
- วิรัตน์ สุมณ, ทิพย์มนต์ ไยเกษ, และ ญญาพร สุมณ. (2560). *หมกสีแดงจากสีน้ำครั่ง*. นวัตกรรมผลงานนวัตกรรม งานเกษตรแฟร์ประจำปี 2560 ศาสตร์แห่งแผ่นดิน ทำกิน ตามคำพ่อสอน (27 ม.ค. – 4 ก.พ. 2560). สถาบันวิจัย และพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Adams, M. R., & Moss, M. O. (2008). *Food microbiology* (3rd ed.). Cambridge: RSC Publishing.
- AOAC. (2000). *Official method of analysis of AOAC International* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.
- Avirutnant, W., & Pongpan, A. (1983). The antimicrobial activity of some Thai flowers and plants. *Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10, 81–86.
- Azu, N. C., & Onyeagba, R. A. (2007). Antimicrobial properties of extracts of *Allium cepa* (onions) and *Zingiber officinale* (ginger) on *Escherichia coli*, *Salmonella typhi* and *Bacillus subtilis*. *Journal of Tropical Medicine*, 3, 351–372.
- Gelinski, J. M. L. N., Baratto, C. M., Casagrande, M., de Oliveira, T. P., Megiolaro, F., de Martini Soares, F. A. S., de Souza, E. M. B., Vicente, V. A., & Fonseca, G. G. (2019). Control of pathogens in fresh pork sausage by inclusion of *Lactobacillus sakei* BAS0117. *Canadian Journal of Microbiology*, 65, 831–841.
- International Organization for Standardization. (2007). ISO6579:2002/Amd 1:2007 detection of *Salmonella* spp. in animal faeces and in environmental samples from the primary production stage, amendment 1, annex D. In *Microbiology of food and animal feeding stuffs: Horizontal method for the detection of Salmonella spp.* (4th ed., pp. 1–9). Geneva, Switzerland.
- Janiszewska-Turak, E., Walczak, M., Rybak, K., Pobiega, K., Gniewosz, M., Wozniak, L., & Witrowa-Rajchert, D. (2022). Influence of fermentation beetroot juice process on the physico-chemical properties of spray dried powder. *Molecules*, 27, 1008. <https://doi.org/10.3390/molecules27031008>
- Jimtaisong, A., Janthadee, R., & Nakrit, T. (2013). In vitro antioxidant activities of laccic acids and its aluminum lake. *Food Science and Biotechnology*, 22(4), 1055–1061.
- Mao, Q. Q., Xu, X. Y., Cao, S. Y., Gan, R. Y., Corke, H., Beta, T., & Li, H. B. (2019). Bioactive compounds and bioactivities of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Food*, 8(6), 185. <https://doi.org/10.3390/foods8060185>
- Osiriphun, S., Pongpoolponsak, A., & Tuitemwong, K. (2004). Quantitative risk assessment of *Salmonella* spp. in fermented pork sausage (Nham). *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 38, 52–65.
- Sayago-Ayerdi, S. G., Arranz, S., Serrano, J., & Goni, I. (2007). Dietary fiber content and associated antioxidant compounds in roselle flower (*Hibiscus sabdariffa* L.) beverage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 7886–7890.
- Shiva Rani, S. K., Saxena, N., & Udaysree, N. (2013). Antimicrobial activity of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Global Journal of Pharmacology*, 7, 87–90.
- Sirotamarat, S. (2005). Potential of medicinal plants and herbal tea products for antibacterial activity against diarrheal bacteria. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 29, 82.
- Ungphaiboon, S., Supavita, T., Singchangchai, P., Sungkarak, S., Rattanasuwan, P., & Itharat, A. (2005). Study on antioxidant and antimicrobial activities of turmeric clear liquid soap for wound treatment of HIV patients. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 27(2), 569–578.

อิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันสำหรับการตรวจวัดที่ว่องไวของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินที่ตกค้างในน้ำนมดิบ

A competitive immunosensor for sensitive detection of neomycin residues in raw milk

เจ๊ะฮาซัน เจ๊ะอุบง^{1*} และ กัญญารัตน์ โมคกุล²
Chehasan Cheubong^{1*} and Kanyarat Mokkul²

Received: 29 June 2024 ; Revised: 4 August 2024 ; Accepted: 13 September 2024

บทคัดย่อ

นีโอมัยซินเป็นยาปฏิชีวนะกลุ่มอะมิโนไกลโคไซด์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการรักษาโรคติดเชื้อแบคทีเรียในโคนม เนื่องจากสามารถฆ่าได้ทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ถ้ามนุษย์ได้รับในปริมาณสูงจะส่งผลเป็นพิษต่อไตและระบบประสาทหู ดังนั้นการตกค้างในปริมาณสูงของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินในน้ำนมดิบจะส่งผลเสียต่อผู้บริโภค ด้วยเหตุนี้เทคนิคการตรวจวัดการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินในน้ำนมดิบที่มีความว่องไวสูง มีความจำเพาะและแม่นยำในการตรวจวัดจึงมีความจำเป็นมากที่จะต้องพัฒนาเพื่อควบคุมปริมาณการตกค้างของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภค งานวิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันเพื่อตรวจวัดการตกค้างของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบ โดยทำการเชื่อมนีโอมัยซินเข้ากับโโบวีนซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin, BSA) แล้วนำไปบ่มในไมโครเพลตเพื่อเป็นตัวแทนแข่งขันกับนีโอมัยซินในสารตัวอย่างในการจับกับแอนติบอดีนีโอมัยซินที่เชื่อมไปโอดิน หลังจากนั้นการแข่งขันระหว่างนีโอมัยซินที่อยู่ในไมโครเพลตกับนีโอมัยซินในตัวอย่างจะถูกตรวจวัดด้วยสีที่เกิดจากการเร่งของเอนไซม์ HRP-streptavidin (horseradish peroxidase (HRP)-labeled streptavidin) ที่อยู่ในไมโครเพลตกับสับสเตรท 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine (TMB) ในสภาวะมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซิน โดยมีปริมาณต่ำสุดที่วัดได้คือ 4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (4 ppb) มีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 1 ถึง 50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ($R^2=0.9976$) มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 3.7 มีความจำเพาะเจาะจงต่อยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินสูง และมีความถูกต้อง (accuracy) ของการตรวจวัดการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินในตัวอย่างน้ำนมดิบด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การไถ่คืนที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (%Recovery; 85-111%) ดังนั้นเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่พัฒนาในครั้งนี้จึงเป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถใช้ตรวจสอบการตกค้างของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบได้ในปริมาณต่ำ มีความว่องไวสูง แม่นยำ ใช้งานง่าย และมีศักยภาพที่จะพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประเมินคุณภาพของน้ำนมดิบเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคได้

คำสำคัญ: อิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน, ยาปฏิชีวนะ, นีโอมัยซิน, น้ำนมดิบ

Abstract

Neomycin is a common broad-spectrum aminoglycoside antibiotic that inhibits the growth of both gram-negative and gram-positive bacteria. Overdose has the potential to cause ototoxicity as well as nephrotoxicity. Thus, the presence of neomycin in raw milk poses a possible health risk to consumers. Therefore, sensitive and selective methods are necessary to monitor and detect neomycin. A competitive immunosensor was designed to detect neomycin residues in raw milk. First, a microplate was coated with conjugated neomycin-bovine serum albumin and used as an analytical competitor. The competitive immunosensor was created by incubating free neomycin with anti-neomycin antibodies labelled with HRP-streptavidin. After the competitive reaction, captured HRP catalysed the oxidation of 3,3',5,5'-

¹ อาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹ Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

² Bachelor student, Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

* Corresponding author: Email: Chehason@rmutt.ac.th

tetramethylbenzidine (TMB) in the presence of hydrogen peroxide (H_2O_2) to create colour responses. The proposed immunosensor had excellent analytical performance with a low detection limit of 4 ng/mL, a wide linear range from 1 to 50 ng/mL ($R^2 = 0.9976$), high precision with a %RSD of 3.7, and high selectivity in neomycin detection compared to six competitive antibiotics. The applicability of the sensor was evaluated by analysing neomycin in raw milk samples. Detection of neomycin in real samples demonstrated remarkable accuracy, with a recovery rate of 85–111%. The results showed that the proposed immunosensor can successfully detect neomycin in raw milk samples with excellent sensitivity and ease of use. Additionally, the proposed method has great potential for farmers to detect neomycin residues in raw milk.

Keywords: Competitive immunosensor, antibiotic, neomycin, raw milk

บทนำ

การตกค้างของยาปฏิชีวนะจัดเป็นการปนเปื้อนที่พบมากที่สุด ในน้ำนมและผลิตภัณฑ์จากนม (Cháfer-Pericás *et al.*, 2010) โดยนีโอมัยซิน (neomycin) เป็นยาปฏิชีวนะที่นิยมใช้มากที่สุด ชนิดหนึ่งในการรักษาโรคทางเดินอาหารในปศุสัตว์ที่เกิดจากการ ติดเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากนีโอมัยซินเป็นยาปฏิชีวนะในกลุ่ม อะมิโนไกลโคไซด์ (aminoglycoside antibiotic) ที่สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและ แกรมลบ (broad spectrum antibacterial activities) (Schwarz *et al.*, 2016) ในปัจจุบันพบว่านีโอมัยซินมีการใช้กันอย่างกว้าง ขวางมากขึ้นเพื่อรักษาโรคลำไส้อักเสบ (Gastrointestinal infection) ทั้งใน วัว แกะ แพะ หมู และสัตว์ปีก มากกว่านั้นมัน ยังสามารถใช้ในการรักษาโรคเต้านมอักเสบ (Mastitis) ได้ผล ดีอีกด้วย (van Duijken *et al.*, 2019; Glinka *et al.*, 2020; Jospe-Kaufman *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตามนีโอมัยซินที่ถูก ใช้ในการรักษาดังกล่าวจะมีส่วนตกค้างในเนื้อเยื่อหรือน้ำนมดิบ ซึ่งพบว่า มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทหู (Ototoxic) และ ระบบการทำงานของไต (Nephrotoxic) ทั้งในสัตว์และมนุษย์ ที่เป็นผู้บริโภค ซึ่งเป็นส่วนกระตุ้นให้เกิดการแพ้อาหาร และ อาการดื้อต่อยาปฏิชีวนะ (Rosenberg *et al.*, 2020; Ogier *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021) และยิ่งกว่านั้นการตกค้างของ ยาปฏิชีวนะในน้ำนมดิบยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการหมัก ของผลิตภัณฑ์จากนมอีกเช่นกัน (Arsand *et al.*, 2016) ทำให้ หลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการคุ้มครองผู้บริโภคในกลุ่ม ประเทศใหญ่ๆ ได้มีการกำหนดปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (maximum residue limits; MRLs) ของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบ เช่น องค์การอาหารและยาสหรัฐ (FDA) กำหนดไว้พบได้ ไม่เกิน 150 $\mu\text{g/kg}$ (Luan *et al.*, 2020) ในประเทศไทยพบว่า ยังไม่มีการห้ามใช้หรือกำหนดค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด ของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบ จึงมีโอกาสมากที่จะพบการตกค้าง ของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบจากเกษตรกรในประเทศไทย ดังนั้น การพัฒนาวิธีตรวจสอบปริมาณสารตกค้างของนีโอมัยซิน ที่ถูกต้อง แม่นยำ และใช้งานง่าย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อ

การพัฒนาคุณภาพของน้ำนมดิบและผลิตภัณฑ์จากนมของ เกษตรกรไทยเพื่อการส่งออกในอนาคต

วิธีทั่วไปที่ใช้ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารตกค้างนี้ โอมัยซินในอาหารที่นิยมใช้ ได้แก่ การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค ทางสเปกโทรสโกปี (Tzanavaras *et al.*, 2007) เทคนิคโครมา โทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) (Abualhasan *et al.*, 2012; Ianni *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018) เทคนิคลิควิดโครมา โทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Liquid Chromatography Mass Spectrometer, LC-MS) (Zu *et al.*, 2018; Pandey *et al.*, 2020) เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical technique) (Giang & Huan, 2021; Li *et al.*, 2022) และเทคนิคแคปิลลารี อิเล็กโทรโฟเรซิส (capillary electrophoresis) (García-Cam paña *et al.*, 2009) แต่พบว่าเทคนิคดังกล่าว มีข้อจำกัดคือ มีขั้นตอนเตรียมตัวอย่างที่ซับซ้อนเนื่องจากนีโอมัยซินเป็น สารประกอบที่ไม่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีให้สีหรือเรืองแสงได้ (chromophores or fluorophores) การวิเคราะห์จึงต้องมีการ ทำให้เกิดสารอนุพันธ์ก่อนหรือหลังการวิเคราะห์ (pre- or post-column derivatization) (Zhang *et al.*, 2021) รวมถึง เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูง ผู้วิเคราะห์จะต้องมีความชำนาญ ในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี และต้องส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อพัฒนาวิธีตรวจวิเคราะห์ สารตกค้างนีโอมัยซินที่มีความไว ใช้งานง่าย และ รวดเร็วในการตรวจวิเคราะห์ เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์ (Immunosensor) จึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมและมี แนวโน้มสูงที่จะสามารถตรวจวัดสารตกค้างได้ในปริมาณต่ำ (He *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020) เนื่องจากเทคนิค ดังกล่าวอาศัยการจับกันระหว่าง แอนติเจน (Antigen) กับ แอนติบอดี (Antibody) ที่มีจำเพาะเจาะจงกันสูง (Li *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2007; Cheubong *et al.*, 2023) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน (Competitive immunosensor) ซึ่งสามารถตรวจสอบสารที่มี โมเลกุลเล็ก เช่น สารกลุ่มยาฆ่าแมลงหรือยาปฏิชีวนะได้อย่าง

แม่นยำ รวดเร็วและมีความไวสูงในการวิเคราะห์สารเหล่านี้ในปริมาณต่ำ (Merola *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2018)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่สามารถตรวจวัดสารตกค้างนีโอมาซินในน้ำนมดิบที่ให้ผลการตรวจวัดที่ถูกต้อง รวดเร็ว ง่ายและใช้งานง่ายโดยใช้เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. สารเคมี

สารเคมีสำคัญที่ใช้ได้แก่ นีโอมาซิน โพลีโคลนอล แอนติบอดี (from rabbit, Catalog No.6615-0005, Bio-rad), นีโอมาซินซัลเฟต, เจนตามัยซินซัลเฟต, สเตรปโตมัยซินซัลเฟต, เพนนิซิลลินซัลเฟต, เตตระไซคลิน, แอมพิซิลลิน, อะม็อกซิซิลลิน, โบวินเซรัมอัลบูมิน, 1-(3-ไดเมทิลอะมิโนโพรพิล), 3-เอทิลคาร์โบไดอิมิดไฮโดรคลอไรด์ (1-(3-Dimethyl aminopropyl), 3-ethylcarbodiimide hydrochloride, EDC), 3,3',5,5'-เตตระเมทิลเบนซิดีน(3,3',5,5'-tetramethyl ben zidine,TMB), ฮอร์สแรดิช เปอร์ออกซิเดส สเตรปตาวิดีน (Horseradish peroxidase-strepta vidin, HRP-Streptavidin), ไบโอดีน (Biotin 3-sulfo- N-hydroxysuccinimide ester sodium salt, BAC-SulfoNHS) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) จากบริษัท Sigma-Aldrich สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical grade)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญได้แก่ เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV-P1 (UV-Visible Spectro photometer, MAPADA, CN), ไมโครเพลตติชว (Poly propylene microplate, Thermo Fisher) และ เครื่องวัด pH รุ่น Model UB-10 (Denver instrument, USA)

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานนีโอมาซินที่เชื่อมต่อกับโบวินเซรัมอัลบูมิน

ทำการเชื่อมสารละลายมาตรฐานนีโอมาซินกับโบวินเซรัมอัลบูมินด้วยปฏิกิริยาเคอไมคัล (Chen *et al.*, 2007) โดยทำการชั่งนีโอมาซิน 50 มิลลิกรัมและ โบวินเซรัมอัลบูมิน 20 มิลลิกรัม ละลายด้วย 10 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งอีดีซี (EDC) 20 มิลลิกรัม ละลายด้วย 10 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วเติมลงไปในการละลายข้างต้นและกวนต่อไปอีก 1 ชั่วโมง นำสารละลายผสมที่ได้ใส่ถุงไดอะไลซิส (Mw cutoff : 10,000 Dalton) นำไปไดอะไลซิสใน 10 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.5 ที่อุณหภูมิ 4

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วันเพื่อนำเอานีโอมาซินอิสระที่ไม่เชื่อมต่อกับโบวินเซรัมอัลบูมินออกจากสารละลาย แล้วนำสารละลายที่ได้เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อไปใช้ต่อไป

4. การติดฉลากแอนติบอดีนีโอมาซินด้วยไบโอดีน

การติดฉลากแอนติบอดีนีโอมาซินด้วยไบโอดีนทำได้โดยนำแอนติบอดีนีโอมาซินที่ผ่านการไดอะไลซิสใน 10 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.2 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมกับไบโอดีน (BAC-SulfoNHS) ที่ความเข้มข้น 40 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร แล้วกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายผสมไปไดอะไลซิสที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากไดอะไลซิสแล้วจึงนำสารละลายไปผสมกับ 1% โบวินเซรัมอัลบูมินที่ละลายใน 10 มิลลิโมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.4 ปริมาตร 1000 ไมโครลิตร สุดท้ายแล้วจะได้สารละลายแอนติบอดีนีโอมาซินที่ติดฉลากด้วยไบโอดีน ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเพื่อไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

5. เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันสำหรับการตรวจวัดการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมาซิน

การศึกษาครั้งนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน (Competitive immunosensor) ที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของยาปฏิชีวนะนีโอมาซิน โดยใช้แอนติบอดีนีโอมาซินที่จำเพาะกับนีโอมาซินซึ่งเป็นแอนติเจนเพื่อตรวจวัดการตกค้างของนีโอมาซินในน้ำนมดิบ ดังแสดงไว้ใน Figure 1 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มด้วยทำการตรึงนีโอมาซินที่เชื่อมด้วยโบวินเซรัม อัลบูมินความเข้มข้น 1, 2, 5, 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในไมโครเพลท โดยการบ่มด้วยสารละลายคาร์บอนเตตราบูฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ พีเอช 9.6 เป็นสารเชื่อม หลังจากบ่มเป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำไมโครเพลทมาล้างซ้ำ 3 ครั้งด้วยบัฟเฟอร์สำหรับชะล้าง (1% โบวินเซรัมอัลบูมินใน 0.1โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.4) จากนั้นผสมแอนติบอดีนีโอมาซินที่ติดฉลากด้วยไบโอดีน ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรกับนีโอมาซินที่ทราบความเข้มข้นหรือสารละลายตัวอย่างน้ำนมดิบในสัดส่วนปริมาตร 1:1 ในสารละลาย 10 มิลลิโมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6, 7, 7.4 และ 8 แล้วบ่มลงในไมโครเพลทที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 20 40 และ 60 นาที หลังจากบ่มทำการล้างซ้ำ 3 ครั้ง ขั้นตอนต่อไปทำการบ่มสเตรปตาวิดีน-เปอร์ออกซิเดส ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรและทำการล้างไมโครเพลทซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นเติม 3, 3' 5,5' เตตระเมทิลเบนซิดีน

(TMB) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะได้สารละลายสีฟ้า ขั้นตอนสุดท้ายเติมกรดซัลฟิวริกลงไป สารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเหลือง นำไปตรวจวัดสัญญาณที่ได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยสัญญาณค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จะแปรผกผันกับปริมาณความเข้มข้นของสารนีโอมัยซินที่ต้องการวิเคราะห์

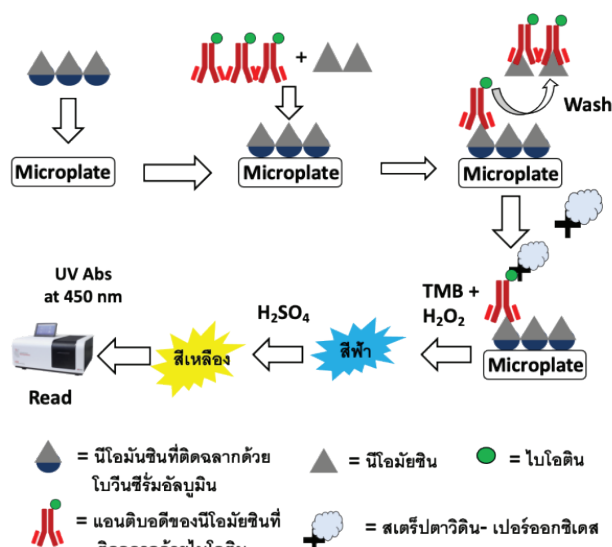


Figure 1 Schematic illustration of the developed competitive immunosensor for detection of neomycin residues.

6. การตรวจวัดการตกค้างของนีโอมัยซินในตัวอย่างน้ำนมดิบ

ทำการวิเคราะห์ตรวจหาปริมาณการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินในน้ำนมดิบ โดยนำน้ำนมดิบที่ได้จากเกษตรกรที่เลี้ยงวัวนมบางแห่งในจังหวัดสระบุรีและปทุมธานี มา 3 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปสกัดเพื่อแยกไขมันและโปรตีนออกด้วยวิธีดังนี้ ตวงน้ำนมดิบ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดปั่นเหวี่ยง ขนาด 50 มิลลิลิตร และเติมเอทิลอะซิเตต 10 มิลลิลิตร ตามลงไป นำไปสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเหวี่ยง เป็นเวลา 20 นาที ที่ความเร็วรอบ 6000 รอบต่อวินาที นำเฉพาะสารละลายส่วนที่ใสมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณยาปฏิชีวนะที่ตกค้างในน้ำนมดิบทั้ง 3 ตัวอย่าง (A,B และ C) ด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน โดยนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้กับปริมาณความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินที่ตรวจพบ นำไปคำนวณสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนีโอมัยซิน

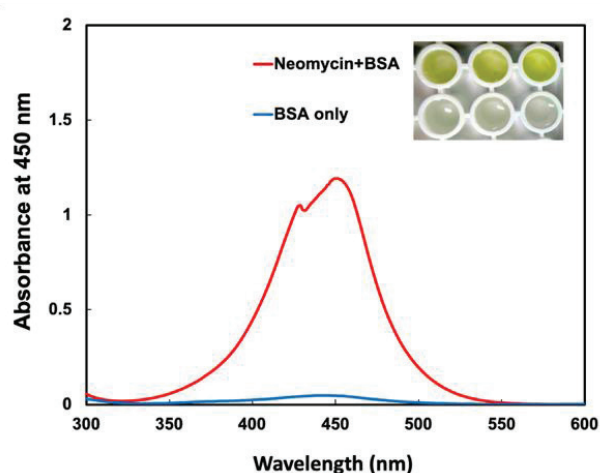


Figure 2 The UV-visible spectra obtained from immobilized Neomycin+BSA conjugate (red curve) and BSA only (blue curve). (Inset; yellow-colored products).

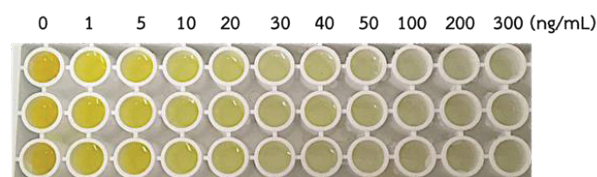


Figure 3 Photographs of competitive immunosensor responses to different concentrations of neomycin by yellow-colored products.

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. สัญญาณที่ตอบสนองต่อการตรวจวัดนีโอมัยซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน

เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่พัฒนาในครั้งนี้อาศัยการแข่งขันในการจับแอนติบอดีนีโอมัยซินระหว่างนีโอมัยซินที่ถูกตรึงในไมโครเพลตกับนีโอมัยซินอิสระที่อยู่ในสารละลายมาตรฐานหรือสารตัวอย่าง นีโอไมซินที่ถูกตรึงในไมโครเพลตนั้นจะต้องเชื่อมต่อกับโบวินซีรัมอัลบูมินเพื่อที่จะสามารถตรึงในไมโครเพลตโดยสารละลายคาร์บอนแบล็คฟลูออโรเป็นสารเชื่อมได้ เมื่อทำการตรึงนีโอมัยซินที่เชื่อมต่อกับโบวินซีรัมอัลบูมินเปรียบเทียบกับโบวินซีรัมอัลบูมินอย่างเดียวพบว่า หลุมที่ตรึงด้วยนีโอมัยซินที่เชื่อมกับโบวินซีรัมอัลบูมินมีสัญญาณโดยสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร แต่ไม่พบสัญญาณในหลุมที่ตรึงด้วยโบวินซีรัมอัลบูมินเพียงอย่างเดียว ดังแสดงใน Figure 2 จึงสามารถยืนยันความสำเร็จในการเชื่อมนีโอมัยซินกับโบวินซีรัมอัลบูมิน ด้วย EDC ที่เป็นสาร amide coupling ที่สร้างพันธะเอไมด์ระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกในโบวินซีรัมอัลบูมินกับนีโอมัยซินซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะชนิดอะมิโนไกลโคไซด์ซึ่งมีหมู่เอมีนในโครงสร้าง

ส่วนการติดฉลากไบโอตินบนแอนติบอดีนีโอมายซินนั้นอาศัยพันธะเอไมด์ระหว่างหมู่N-hydroxysulfo succinimide (sulfo-NHS) esters ที่มีไบโอตินกับหมู่เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (primary or secondary amines) ที่อยู่ในแอนติบอดีนีโอมายซิน โดยสามารถยืนยันการติดฉลากสำเร็จจากสัญญาณสีที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปตรวจวัดสารละลายมาตรฐานนีโอมายซินที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน ดังแสดงใน Figure 3 พบว่าสัญญาณสีเหลืองที่เกิดขึ้นนั้นมีสีที่จางลงไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนีโอมายซินเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกันระหว่างสีเหลืองกับความเข้มข้นของนีโอมายซิน โดยสัญญาณที่ลดลงเมื่อปริมาณของนีโอมายซินเพิ่มขึ้นนั้น หมายความว่า นีโอมายซินอิสระในสารละลายมีปริมาณมากจึงแย่งจับกับแอนติบอดีนีโอมายซินทำให้เหลือแอนติบอดีนีโอมายซินน้อยลงที่จะไปจับกับนีโอมายซินที่ตรึงบนไมโครเฟลต ส่งผลทำให้สัญญาณน้อยลง และทำให้ปริมาณเอนไซม์สเตรปตาวิดิน-เปอร์ออกซิเดส สำหรับเร่งปฏิกิริยาน้อยลงด้วย นอกจากนี้จะสามารถยืนยันการติดฉลากไบโอตินกับแอนติบอดีสำเร็จแล้ว ผลการศึกษายังสามารถตรวจวัดสัญญาณที่ตอบสนองต่อการตรวจวัดนีโอมายซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้ด้วย

2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดนีโอมายซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน

เพื่อให้วิธีวิเคราะห์มีความไวและมีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดนีโอมายซิน จึงได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวิธีวิเคราะห์โดยศึกษาปัจจัยดังนี้ คือ ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของนีโอมายซินที่เชื่อมโพรวินเซิร์มอัลบูมิน (1 2 5 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของสารละลายบัฟเฟอร์ (6 7 7.4 และ 8) และเวลาที่แตกต่างกันในการจับกันของนีโอมายซินกับแอนติบอดี (10 20 40 และ 60 นาที) โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในทุกการทดลอง จากนั้นใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นๆ ในแต่ละปัจจัยที่ได้ศึกษา

การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการตรึงนีโอมายซินที่เชื่อมโพรวินเซิร์มอัลบูมินในไมโครเฟลตมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมปริมาณความเข้มข้นให้เหมาะสม เพื่อให้การตรวจวัดนีโอมายซินมีประสิทธิภาพเนื่องจากนีโอมายซินที่ตรึงในไมโครเฟลตจะเป็นตัวจับกับแอนติบอดีนีโอมายซินแบบแข่งขันกับนีโอมายซินอิสระในหลอดทดลอง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 1 2 5 7 และ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงใน Figure 4a ผลการศึกษาพบว่าค่าการ

ดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของนีโอมายซินที่เชื่อมโพรวินเซิร์มอัลบูมินที่ตรึงในไมโครเฟลต และที่ความเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรนั้นได้ผลค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด แม้ว่าเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้นอีกเป็น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าการดูดกลืนแสงไม่ได้เพิ่มขึ้นเนื่องจาก พื้นที่ในไมโครเฟลตมีจำกัด ถ้ามีการตรึงสารเข้มข้นมากเกินไปอาจจะมีการซ้อนทับหรือการแย่งเกาะบนผิวไมโครเฟลตจนทำให้ปริมาณสารที่ตรึงได้นั้นน้อยลงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจับของแอนติบอดีลดลงเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการตรึงนีโอมายซินที่เชื่อมโพรวินเซิร์มอัลบูมินในไมโครเฟลตคือที่ 7 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

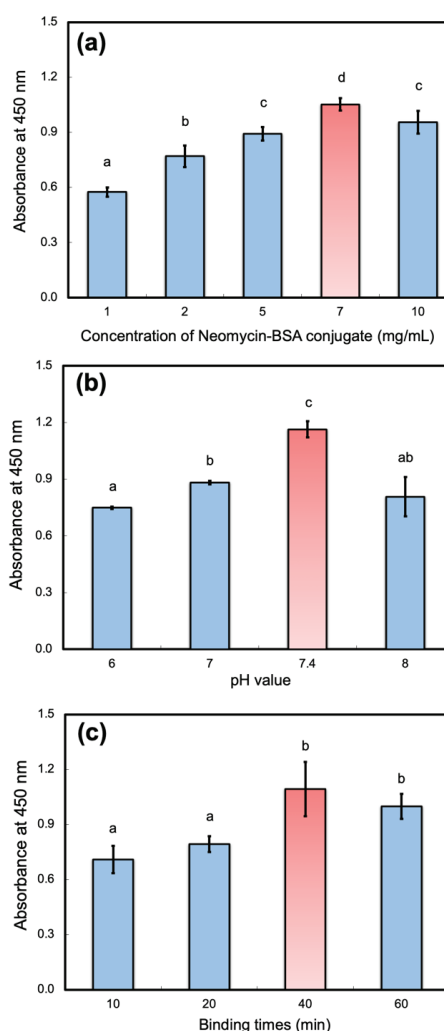


Figure 4 Optimization of the experimental condition on the competitive immunosensor response for neomycin detection. (a) Optimization of the concentration of neomycin-BSA conjugate. (b) Optimization of the pH value. (c) Optimization of the binding time. The red-bar plots present the optimized conditions. Different letters above the bars indicate statistically significant difference at $P < 0.05$ (one-way ANOVA, $N=3$). The error bars were obtained from triplicate experiments.

ค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยาและการจับกันของแอนติเจนกับแอนติบอดี ดังแสดงใน Figure 4b พบว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เปลี่ยนไปจากพีเอช 6 ไปจนถึงพีเอช 8 สัญญาณที่ตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าดูดกลืนแสงมากขึ้นจนถึงที่ค่าพีเอช 7.4 และมีการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 7.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมของเอนไซม์ซึ่งเป็นสารชีวโมเลกุลชนิดโปรตีนที่มีความไวต่อสภาพความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย เพราะฉะนั้นค่าพีเอชที่ต่ำหรือสูงเกินไป จะส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง จึงส่งผลต่อผลผลิตที่ได้ซึ่งใช้เป็นสัญญาณที่ตอบสนองต่อการตรวจวัดนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน ในครั้งนี้ ดังนั้นพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ 7.4 นั้นเหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์

ปัจจัยสุดท้ายที่ทำการศึกษาคือเวลาที่เหมาะสมในการจับกันของแอนติบอดีนีโอไมซินกับนีโอไมซินที่ตรึงไว้ในไมโครเพลต ดังแสดงใน Figure 4c พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจาก 10 นาทีไปจนถึง 40 นาที และลดลงที่เวลา 60 นาที จึงสรุปได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป การจับกันระหว่างแอนติเจนกับแอนติบอดีนั้นมีความเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปจนถึงเวลา 40 นาที การจับกันก็ถึงจุดที่จับกันอย่างสมดุล (equilibrium of immunoreaction) ทำให้หลังจากนั้นที่เวลา 60 นาที ไม่มีการจับกันที่เพิ่มขึ้นอีก ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงไม่เพิ่มขึ้นไปกว่าที่เวลา 40 นาที ดังนั้นที่เวลา 40 นาทีจึงเป็นเวลาที่เหมาะสมในการจับกันระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดี

สรุปสภาวะที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ที่ให้สัญญาณตอบสนองต่อการตรวจวัดนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันได้ดีที่สุดคือ ตรึงนีโอไมซินที่เชื่อมโพรวินเซิร์มอัลบูมินในไมโครเพลตความเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์ที่ 7.4 และ 40 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการจับกันระหว่างแอนติเจนและแอนติบอดี ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้ในการหาประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์และตรวจวัดนีโอไมซินในตัวอย่างน้ำนมดิบต่อไป

3. ประสิทธิภาพของการตรวจวัดนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน

นำเอาสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ศึกษาข้างต้นมาทดสอบหาประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์นีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน โดยทำการศึกษากฎมาตรฐาน ช่วงความเป็นเส้นตรง (standard curve and linearity range) และข้อมูลการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนีโอไมซินที่แตกต่างกัน (0 1 5 10 20 30 40 50 100 200

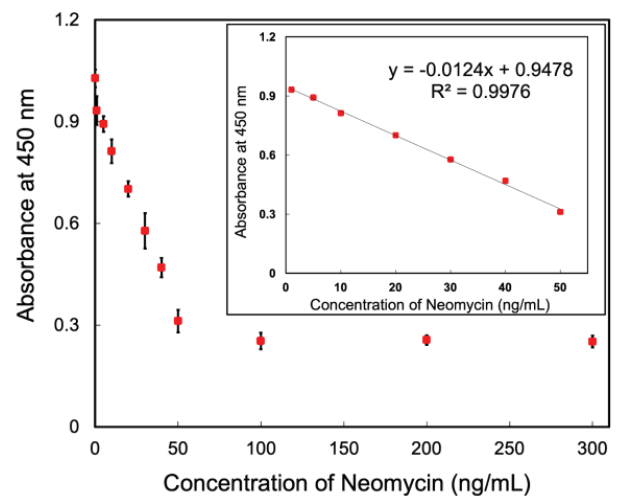


Figure 5 Standard calibration curve of the absorbance at 450 versus different concentration of neomycin and the linear section (inset) of standard curve using the developed competitive immuno- sensor. The error bars were obtained from triplicate experiments.

และ 300 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เพื่อนำไปหาความเข้มข้นของนีโอไมซินในตัวอย่างน้ำนมดิบ นอกจากนั้นยังนำข้อมูลที่ได้ไปหาขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of detection, LODs) และขีดจำกัดในการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQs) รวมถึง ความแม่นยำในการตรวจวัด (precision)

ผลการศึกษากราฟมาตรฐานและช่วงความเป็นเส้นตรงของการวิเคราะห์สารตกค้างนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน ดังแสดงใน Figure 5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนีโอไมซินมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร จะมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีการแข่งขันเพิ่มขึ้นของสารนีโอไมซินอิสระในการจับกับแอนติบอดีที่ติดฉลากด้วยโไบโอดีน ทำให้ปริมาณของแอนติบอดีที่สามารถจับกับนีโอไมซินที่ตรึงอยู่บนไมโครเพลตน้อยลง จึงมีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงตามลำดับ ดังที่แสดงให้เห็นความเข้มข้นของสีเหลืองเมื่อหยุดปฏิกิริยาด้วยกรดซัลฟิวริกที่ลดลงตามความเข้มข้นที่มากขึ้นของสารละลายมาตรฐานนีโอไมซิน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ช่วงความเป็นเส้นตรงในการการตรวจวัดสารตกค้างนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน อยู่ในช่วง 1-50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9976

การศึกษาขีดจำกัดในการตรวจพบและขีดจำกัดในการตรวจวัดเชิงปริมาณของวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนา ทำได้โดยการทดลอง 10 ซ้ำด้วยสารละลายแบบบลังก์ (Blank solution) ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำไปหาค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (Standard deviation, SD) พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.018 จากนั้นนำค่า SD มาคำนวณหาขีดจำกัดในการตรวจพบและขีดจำกัดในการตรวจวัดเชิงปริมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ $3SD/m$ และ $10SD/m$ ตามลำดับ เมื่อ m คือค่าความชันที่ได้จากสมการเส้นตรง (slope=0.0124) จึงสรุปได้ว่า ขีดจำกัดในการตรวจพบมีค่าเท่ากับ 4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร หรือ 4 ppb และขีดจำกัดในการตรวจพบเชิงปริมาณมีค่าเท่ากับ 14 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร หรือ 14 ppb ขีดจำกัดในการตรวจวัดนีโอไมซินโดยใช้เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันความว่องไวสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์ที่ได้รายงานก่อนหน้านี้พบว่า เทคนิคที่พัฒนาครั้งนี้มีความว่องไวเทียบเท่าหรือมากกว่าในบางวิธีที่ผ่านมา (Zhu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2009; Beloglazova *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2016; Qin *et al.*, 2022)

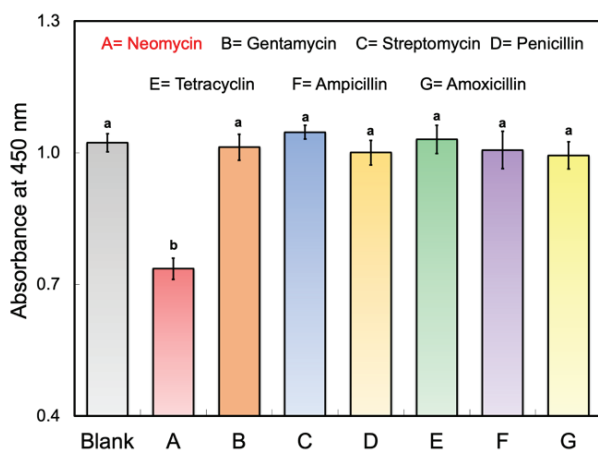


Figure 6 The absorbance at 450 nm of the proposed competitive immunosensor for neomycin and six other interference antibiotics. The antibiotics concentration is 10 ng/mL. Different letters above the bars indicate statistically significant difference at $P < 0.05$ (one-way ANOVA, $N=3$). The error bars were obtained from triplicate experiments.

ความแม่นยำในการ The error bars were obtained from triplicate experiments ตรวจวัดสารตกค้างนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขัน สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ซ้ำ (Repeatability) โดยเลือกใช้สารละลายมาตรฐานนีโอไมซิน ที่ความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์จำนวน 7 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตรไปคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation ; RSD) พบว่า ผลการวิเคราะห์หาปริมาณนีโอไมซิน ที่ความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 3.7 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีตรวจวิเคราะห์สารตกค้างนีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีความแม่นยำสูงในการวิเคราะห์

4. ความจำเพาะเจาะจงของเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันต่อยาปฏิชีวนะนีโอไมซิน

เพื่อให้อิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อยาปฏิชีวนะนีโอไมซินในน้ำนมดิบ จึงได้ทำการตรวจวัดยาปฏิชีวนะชนิดอื่นที่มีโอกาสสูงที่จะพบในน้ำนมดิบซึ่งอาจจะมีผลรบกวนการวิเคราะห์ยาปฏิชีวนะนีโอไมซินได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกยาปฏิชีวนะกลุ่มอะมิโนไกลโคไซด์มา 2 ชนิด คือ เจนตามัยซิน และสเตรปโตมัยซิน ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับนีโอไมซิน เนื่องจากอยู่ในกลุ่มเดียวกัน และเลือกยาปฏิชีวนะกลุ่มอื่นที่พบบ่อยในน้ำนมดิบ เช่น เพนนิซิลลิน เตตระไซคลิน แอมพิซิลลิน และ อะม็อกซิซิลลิน มาทดสอบด้วยวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนา โดยตรวจวัดที่ความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของนีโอไมซินที่ความเข้มข้น 0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (สารละลายแบลนด์) และ 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ผลการศึกษาดังแสดงใน Figure 6 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเมื่อทดสอบด้วยยาปฏิชีวนะที่เลือกมาทดสอบทุกชนิดทั้งในกลุ่มอะมิโนไกลโคไซด์และกลุ่มอื่นนั้นไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับสารละลายแบลนด์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม one-way ANOVA หมายความว่า ยาปฏิชีวนะชนิดอื่นไม่สามารถรบกวนการวิเคราะห์นีโอไมซินด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนา ในขณะที่การทดสอบยาปฏิชีวนะนีโอไมซินนั้นค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ความเข้มข้นเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาในครั้งนี้นี้มีความจำเพาะเจาะจงต่อยาปฏิชีวนะนีโอไมซินสูง

5. การตรวจวัดการตกค้างของนีโอไมซินในตัวอย่างจริงของน้ำนมดิบ

เมื่อนำตัวอย่างน้ำนมดิบมาทั้ง 3 ชนิดคือ A B และ C ที่ได้จากฟาร์มโคนมของเกษตรกรในจังหวัดสระบุรีและปทุมธานี มาวิเคราะห์หาการตกค้างของยาปฏิชีวนะ นีโอไมซินว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยหรือไม่ โดยใช้เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนา ผลการศึกษาแสดงดัง Table 1 พบว่า ไม่พบการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอไมซินในตัวอย่างน้ำนมดิบชนิด A และ C แต่พบการตกค้างในตัวอย่างชนิด B ในปริมาณ 14 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณที่พบนั้นยังต่ำกว่า ค่าขีดจำกัดการตรวจพบ (MRLs) ที่กำหนดไว้พบได้ไม่เกิน 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Luan *et al.*, 2020) ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ได้กำหนดค่าขีดจำกัดการตรวจพบยาปฏิชีวนะนีโอไมซินในน้ำนมดิบ แต่การตรวจวัดการตกค้างของนีโอไมซินมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการเพื่อควบคุมการใช้ยาปฏิชีวนะให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภค

Table 1 Neomycin residues detection in raw milk samples using the proposed competitive immuno- sensor ($n=3$).

Raw milk samples	Neomycin concentration ($\mu\text{g/L}$)
A	ND
B	14 ± 1.5
C	ND
Blank	ND

* ND= Not detected

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคอิมมูโนเซนเซอร์แบบแข่งขันในการตรวจวัดการตกค้างของนีโอมัยซินในตัวอย่างจริงของน้ำนมดิบ จึงได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน (% Recovery) โดยนำสารละลายมาตรฐาน นีโอมัยซินที่ทราบความเข้มข้นเติมลงในน้ำนมดิบทั้ง 3 ชนิด (Sample Spike) ที่ความเข้มข้น 1 10 และ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร จากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน

จากการศึกษาพบว่า เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนอยู่ในช่วง 85 ถึง 111 เปอร์เซ็นต์ และค่า %RSD อยู่ในช่วง 2.21 ถึง 11.61 ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางเคมีวิเคราะห์ จึงสรุปได้ว่าเทคนิคอิมมูโนเซนเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนานั้นมีความแม่นยำ และความถูกต้องสูงในการวิเคราะห์การตกค้างของนีโอมัยซินในน้ำนมดิบ

Table 2 Recovery of neomycin spiked in three raw milk samples by the developed competitive immunosensor ($n=3$).

Raw milk samples	Neomycin concentration ($\mu\text{g/L}$)			Rate of Recovery (%)	RSD (%)
	Native level	Spiked	Found		
A	0	1	0.93	93	9.40
	0	10	10.26	103	9.35
	0	30	28.72	96	2.21
B	14	1	15.11	111	3.27
	14	10	24.77	108	3.77
	14	30	40.80	89	2.96
C	0	1	1.04	104	11.61
	0	10	9.46	94	5.27
	0	30	25.65	85	5.01

Table 3 Comparison with immunosensor and others analytical methods in the determination of neomycin in milk samples.

Methods	Limit of detection LOD ($\mu\text{g/L}$)	Recovery rate (%Recovery)	Reference
Liquid chromatography mass spectroscopy (LC-MS)	50	80-98	Arsand <i>et al.</i> (2016)
Imprinting membrane (MIPs)	7	97-104	Lian <i>et al.</i> (2013)
Surface plasmon resonance sensing (SPR)	6.14	-	de-los-Santos-Alvarez <i>et al.</i> (2009)
Fluorescent polarization immunosensor	4	-	Beloglazova <i>et al.</i> (2016)
Enzyme linked immunosensor	3	87-108	Jin <i>et al.</i> (2009)
Amperometric immunosensor	6.7	95-113	Zhu <i>et al.</i> (2010)
Colorimetric immunosensor	5	75-105	Wang <i>et al.</i> (2009)

Table 3 Comparison with immunosensor and others analytical methods in the determination of neomycin in milk samples. (cont.)

Methods	Limit of detection LOD ($\mu\text{g/L}$)	Recovery rate (%Recovery)	Reference
Chemiluminescent immunosensor	9.4	89-105	Luo <i>et al.</i> (2016)
Antibody-based immunochromatographic	8	-	Qin <i>et al.</i> (2022)
Competitive colorimetric immunosensor	4	85-111	<u>This work</u>

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวัดการตกค้างของนีโอมัยซินในตัวอย่างน้ำนมด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนามากับวิธีวิเคราะห์อื่นที่ใช้ LC-MS SPR และ MIPs หรือเปรียบเทียบกับเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์ที่ได้พัฒนามาก่อนหน้านี้ ดังแสดงใน Table 3 พบว่าวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันนั้นมีความไวในการวิเคราะห์สูงเทียบเท่าและมากกว่าในบางวิธีวิเคราะห์ แต่ถ้าเทียบกับวิธี LC-MS และ SPR นั้นมีข้อได้เปรียบคือมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญเป็นพิเศษและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง รวมทั้งมีศักยภาพที่จะพัฒนาวิธีวิเคราะห์ให้ใช้งานง่ายยิ่งขึ้นไปอีกด้วยการพัฒนาเป็น วิธีทดสอบด้วยสีที่ใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนในการวิเคราะห์ (Lu *et al.*, 2023) ซึ่งเหมาะกับการใช้งานภาคสนามหรือนำไปให้เกษตรกรใช้ทดสอบเบื้องต้นได้

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการพัฒนาเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ให้สัญญาณการวิเคราะห์เป็นสีที่เกิดจากการเร่งของเอนไซม์ HRP ที่ถูกจับอยู่ในไมโครเพลทกับ TMB ในสถานะมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งตอบสนองต่อปริมาณการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินในน้ำนมดิบในแบบผกผัน โดยความเข้มของสีและสัญญาณจะลดลงเมื่อในตัวอย่างน้ำนมดิบมีปริมาณการตกค้างของยาปฏิชีวนะนีโอมัยซินมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่า เทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่ได้พัฒนามานั้นมีประสิทธิภาพที่ดีมากในการวิเคราะห์นีโอมัยซิน มีความไวในการวิเคราะห์สูง ปริมาณต่ำสุดที่วัดได้คือ 4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (4 ppb) มีความแม่นยำ มีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อนีโอไมซิน และสามารถวิเคราะห์หาการตกค้างของนีโอมัยซินในตัวอย่างน้ำนมดิบได้แม่นยำและมีความถูกต้อง เพราะฉะนั้นเทคนิคอิมมูโนเซ็นเซอร์แบบแข่งขันที่พัฒนาในครั้งนี้จึงมีความเป็นไปได้และความเหมาะสมที่จะนำไปเป็นวิธีวิเคราะห์การตกค้างของยาปฏิชีวนะ นีโอไมซินในน้ำนมดิบหรือตัวอย่างอาหารจากนม เพื่อควบคุมการใช้ยาปฏิชีวนะให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนเงินวิจัยจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประเภททุน“นักวิจัยรุ่นใหม่” ประจำปี พ.ศ.2566 (สัญญาเลขที่ NRF66D0601)

เอกสารอ้างอิง

- Abualhasan, M. N., Batrawi, N., Sutcliffe, O. B., & Zaid, A. N. (2012). A validated stability-indicating HPLC method for routine analysis of an injectable lincomycin and spectinomycin formulation. *Scientia pharmaceutica*, 80 (4), 977–986. <https://doi.org/10.379/scipharm.1207-13>
- Arsand, J. B., Jank, L., Martins, M. T., Hoff, R. B., Barreto, F., Pizzolato, T. M., & Sirtori, C. (2016). Determination of amino glycoside residues in milk and muscle based on a simple and fast extraction procedure followed by liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry and time of flight mass spectrometry. *Talanta*, 154, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.045>
- Beloglazova, N., Shmelin, P., & Eremin, S. (2016). Sensitive immunochemical approaches for quantitative (FPIA) and qualitative (lateral flow tests) determination of gentamicin in milk. *Talanta*, 149, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.11.060>
- Cháfer-Pericás, C., Maquieira, Á., & Puchades, R. (2010). Fast screening methods to detect antibiotic residues in food samples. *Trends in Analytical Chemistry*, 29(9), 1038–1049. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.06.004>

- Chen, Y., Shang, Y., Wu, X., Qi, Y., & Xiao, X. (2007). Enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of neomycin in milk: effect of hapten heterology on assay sensitivity. *Food and Agricultural Immunology*, 18, 117–128. <https://doi.org/10.1080/09540100701579829>
- Cheubong, C., Sunayama, H., Takano, E., Kitayama, Y., Minami, H., & Takeuchi, T. (2023). A rapid abiotic/biotic hybrid sandwich detection for trace pork adulteration in halal meat extract *Nanoscale*, 15(37), 15171–15178. <https://doi.org/10.1039/d3nr02863a>
- de-los-Santos-Alvarez, N., Lobo-Castañón, M. J., Miranda-Ordieres, A. J., & Tuñón-Blanco, P. (2009). SPR sensing of small molecules with modified RNA aptamers: detection of neomycin B. *Biosensors & bioelectronics*, 24(8), 2547–2553. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.01.011>
- García-Campaña, A. M., Gámiz-Gracia, L., Lara, F. J., del Olmo Iruela, M., & Cruces-Blanco, C. (2009). Applications of capillary electrophoresis to the determination of antibiotics in food and environmental samples. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 395(4), 967–986. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2867-9>
- Giang, N.T., & Huan, L.Q. (2021). Developing an electrochemical aptasensor using a specific aptamer to detect neomycin antibiotic in milk. *Vietnam Journal of Food Control*. 4(3), 239-250. <https://doi.org/10.47866/2615-9252/vjfc.3830>
- Glinka, M., Wojnowski, W., & Wasik, A. (2020). Determination of aminoglycoside antibiotics: Current status and future trends. *Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116034. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116034>
- He, J. J., Wang, Y., & Zhang, X. Y. (2016). Preparation of artificial antigen and development of IgY- based indirect competitive ELISA for the detection of kanamycin residues. *Food Analytical Methods*, 9(3), 744–751. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0248-x>
- Ianni, F., Pucciarini, L., Carotti, A., Saluti, G., Moretti, S., Ferrone, V., Sardella, R., Galarini, R., & Natalini, B. (2018). Hydrophilic interaction liquid chromatography of aminoglycoside antibiotics with a diol-type stationary phase *Analytica chimica acta*, 1044, 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.08.008>
- Jiang, L., Wei, D., Zeng, K., Shao, J., Zhu, F. & Du, D., 2018. An enhanced direct competitive immunoassay for the detection of kanamycin and tobramycin in milk using multienzyme-particle amplification. *Food Analytical Methods*, 11, 2066-2075. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1185-2>
- Jin, Y., Jang, J. W., Lee, M. H., & Han, C. H. (2006). Development of ELISA and immuno chromatographic assay for the detection of neomycin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 364, 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2005.07.024>
- Jospe-Kaufman, M., Siomin, L., & Fridman, M. (2020). The relationship between the structure and toxicity of aminoglycoside antibiotics. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 30(13), 127218. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2020.127218>
- Li, J., Luo, M., Jin, C., Zhang, P., Yang, H., Cai, R., & Tan, W. (2022). Plasmon-Enhanced Electrochemiluminescence of PTP-Decorated Eu MOF-Based Pt-Tipped Au Bimetallic Nanorods for the Lincomycin Assay. *ACS applied materials & interfaces*, 14(1), 383–389. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c21528>
- Lian, W., Liu, S., Yu, J., Li, J., Cui, M., Xu, W., & Huang, J. (2013). Electrochemical sensor using neomycin-imprinted film as recognition element based on chitosan-silver nanoparticles/graphene-multiwalled carbon nanotubes composites modified electrode, *Biosensors & bioelectronics*, 44, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.01.002>
- Liu, C., Jiang, Y. L., Xiu, L. Y., Qian, R. J., Zhao, M. X., Lou, P. J., Ke, Y. B., Li, G. M., & Jiang, W. X. (2021). Ultratrace analysis of neomycin residues in milk at femtogram levels by flow-through immunoaffinity chromatography test. *Food Analytical Methods*, 14(11), 2298–2307. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02058-5>
- Lu, W., Guo, Y., Yue, Y., Zhang, J., Fan, L., Li, F., Zhao, Y., Dong, C. & Shuang, S., 2023. Smartphone-assisted colorimetric sensing platform based on molybdenum-doped carbon dots nanozyme for visual monitoring of ampicillin. *Chemical Engineering Journal*, 468, 143615. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143615>

- Luan, Y., Wang, N., Li, C., Guo, X., & Lu, A. (2020). Advances in the Application of Aptamer Biosensors to the Detection of Amino- glycoside Antibiotics. *Antibiotics*, 9 (11), 787. <http://doi:10.3390/antibiotics9110787>
- Luo, P. J., Zhang, J. B., Wang, H. L., Chen, X., Wu, N., Zhao, Y. F., Wang, X. M., Zhang, H., Zhang, J. Y., Zhu, L., & Jiang, W. X. (2016). *Rapid and sensitive chemiluminescent enzyme immunoassay for the determination of neomycin residues in milk. Biomedical and Environmental Sciences*, 29(5), 374–378. <https://doi.org/10.3967/bes2016.048>
- Merola, G., Martini, E., Tomassetti, M., & Campanella, L. (2014). New immunosensor for β -lactam antibiotics determination in river waste waters. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 199, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.03.083>
- Ogier, J. M., Lockhart, P. J., & Burt, R. A. (2020). Intravenously delivered aminoglycoside antibiotics, tobramycin and amikacin, are not ototoxic in mice. *Hearing research*, 386 107870. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2019.107870>
- Pandey, S., Dhanani, J., Lipman, J., Roberts, J. A., Wallis, S. C., & Parker, S. L. (2020). Development and validation of LC-MS/MS methods to measure tobramycin and lincomycin in plasma, microdialysis fluid and urine: application to a pilot pharma cokinetic research study. *Clinical chemistry and laboratory medicine*, 58(2), 274–284. <https://doi.org/10.1515/cclm-2019-0780>
- Qin, K., Ding, M., Zhang, C., Zhang, X., Mao, Y., Dang, M., & Zhang, X. (2022). Development of a sensitive monoclonal antibody-based immunochromatographic strip for neomycin detection in milk. *Food and Agricultural Immunology*, 33(1), 315–327. <https://doi.org/10.1080/09540105.2022.2070606>
- Rosenberg, C. R., Fang, X., & Allison, K. R. (2020). Potentiating aminoglycoside antibiotics to reduce their toxic side effects. *PloS one*, 15(9), e0237948. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237948>
- Salama, I., & Gomaa, M. S. (2013). Comparative determination of miconazole, nystatin, hydrocortisone and neomycin by HPTLC/HPLC-DAD. *European journal of Chemistry*, 4(1), 29-34. <https://doi.org/10.5155/eurjchem.4.1.29-34.721>
- Schwarz, S., Kehrenberg, C., & Walsh, T.R. (2016). Use of antimicrobial agents in veterinary medicine and food animal production. *Int J Antimicrob Agents*, 12, 431–437. [https://doi.org/10.1016/s0924-8579\(01\)00297-7](https://doi.org/10.1016/s0924-8579(01)00297-7)
- Tzanavaras, P. D., & Themelis, D. G. (2007). *Review of recent applications of flow injection spectrophotometry to pharmaceutical analysis. Analytica Chimica Acta*, 588(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.01.060>
- van Duijkeren, E., Schwarz, C., Bouchard, D., Catry, B., Pomba, C., Baptiste, K. E., Moreno, M. A., Rantala, M., Ružauskas, M., Sanders, P., Teale, C., Wester, A. L., Ignate, K., Kunsagi, Z., & Jukes, H. (2019). The use of aminoglycosides in animals within the EU: development of resistance in animals and possible impact on human and animal health: a review. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 74(9), 2480–2496. <https://doi.org/10.1093/jac/dkz161>
- Wang, S., Xu, B., Zhang, Y., & He, J. X. (2009). Development of enzyme-linked immuno-sorbent assay (ELISA) for the detection of neomycin residues in pig muscle, chicken muscle, egg, fish, milk and kidney. *Meat science*, 82(1), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.12.003>
- Wang, X., Yang, S., Li, Y., Zhang, J., Jin, Y., Zhao, W., Zhang, Y., Huang, J., Wang, P., Wu, C., & Zhou, J. (2018). Optimization and application of parallel solid-phase extrac- tion coupled with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the determination of 11 aminoglycoside residues in honey and roya royal jelly. *Journal of chromatography. A*, 1542, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.02.029>
- Zhang, X. Y., Zhao, F. F., Sun, Y. W., Mi, T. J., Wang, L. Y., Li, Q., Li, J. Y., Ma, W. T., Liu, W. J., Zuo, J. N., Chu, X. Y., Chen, B., Han, W. M., & Mao, Y. X. (2020). Development of a highly sensitive lateral flow immunoassay based on receptor-antibody-amorphous carbon nanoparti- cles to detect 22 β -lactams in milk. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 321, 128458. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128458>

- Zhang, Q., He, L. Y., Rani, K. K., Wu, D. Y., Han, J. J., Chen, Y. H., & Su, W. J. (2021). Colorimetric detection of neomycin sulfate in tilapia based on plasmonic core-shell Au@PVP nanoparticles. *Food Chemistry*, 356, 129612. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129612>
- Zhu, Y., Son, J. I., & Shim, Y. B. (2010). Amplification strategy based on gold nanoparticle-decorated carbon nanotubes for neomycin immunosensors. *Biosensors & Bioelectronics*, 26(3), 1002–1008. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.08.023>
- Zu, M., Jiang, J., Zhao, H., Zhang, S., Yan, Y., Qiu, S., Yuan, S., Han, J., Zhang, Y., Guo, W., & Yang, S. (2018). Rapid analysis of neomycin in cochlear perilymph of guinea pigs using disposable SPE cartridges and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of chromatography. B, Analytical technologies in the biomedical and life sciences*, 1093-1094, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.06.055>

การประมาณปริมาณน้ำฝนโดยใช้ข้อมูลดาวเทียมฮิมาวารี-9: กรณีศึกษาจังหวัดนครสวรรค์

Rainfall estimation using Himawari-9 satellite data: A case study of Nakhon Sawan Province

นราธิป เฟ่งพิศ¹
Narathip Phengphit¹

Received: 11 June 2024 ; Revised: 11 September 2024 ; Accepted: 27 September 2024

บทคัดย่อ

จังหวัดนครสวรรค์เป็นจังหวัดที่ได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำเป็นประจำทุกปี ทั้งอุทกภัยและภัยแล้ง การพยากรณ์ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่แม่นยำ และครอบคลุม จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการบริหารจัดการน้ำในระดับพื้นที่ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันจากข้อมูลจากดาวเทียม Himawari-9 โดยใช้คุณสมบัติความสว่างของยอดเมฆมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) และสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่าปริมาณน้ำฝน รวมถึงศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนจำนวน 3 วิธี บนฐานคุณสมบัติความสว่างของยอดเมฆ คือ 1) การประมาณค่าโดยวิธี Auto Estimator 2) การประมาณค่าโดยวิธี IMSRA และ 3) การประมาณค่าโดยวิธี Non Linear Relation หลังจากนั้นสอบเทียบปริมาณน้ำฝนรายวันกับสถานีอุตุนิยมวิทยา โดยวิธีการถดถอย (Regression Analysis) พร้อมประเมินค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ในโปรแกรม Microsoft Excel ผลการศึกษาพบว่า ทั้ง 3 วิธีมีค่าสหสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ซึ่งวิธีการประมาณค่าแบบ NLR เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน เพราะมีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด เท่ากับ 0.7163 รวมถึงให้ค่าคลาดเคลื่อน RMSE และค่าคลาดเคลื่อน MAD ต่ำที่สุด เท่ากับ ± 7.61 มิลลิเมตร/วัน และ 3.84 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ

คำสำคัญ: การประมาณค่า, ดาวเทียม Himawari-9, ปริมาณน้ำฝน, การรับรู้จากระยะไกล

Abstract

Every year, Nakhon Sawan Province is affected by water-related disasters, including floods and droughts. Therefore, high-accuracy rainfall data and comprehensive coverage are crucial for effective water management. The main objective of this study was to estimate daily rainfall using data from the Himawari-9 satellite based on cloud-top brightness temperature. The study analyzed the Pearson correlation (r) and developed a model for estimating daily rainfall. Additionally, three rainfall estimation methods were compared using Himawari-9 satellite data: 1) Auto-Estimator, 2) IMSRA, and 3) Non-Linear Relation (NLR). These methods were calibrated using rain gauge data from meteorological stations via linear regression, and their errors were evaluated in Microsoft Excel. The results showed that all three methods had moderate to high correlations between satellite-derived and observed rainfall, which were significant at the 0.01 level. Among them, the NLR method proved to be the most suitable for practical use, with the highest correlation ($r = 0.7163$) and the lowest Root Mean Square Error (RMSE) of ± 7.61 mm/day and Mean Absolute Deviation (MAD) of 3.84 mm/day.

Keywords: The estimation, Himawari-9 satellite, rainfall, remote sensing

¹ สาขาวิชาภูมิศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

¹ Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Nakhon Sawan Rajabhat University

* Corresponding author: Email: narathip.ph@nsru.ac.th

บทนำ

ฝน เป็นหนึ่งในหยาดน้ำฟ้า ที่เกิดจากการควบแน่นของละอองน้ำในเมฆ จนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตามแรงโน้มถ่วงของโลกตกลงมายังโลก เป็นหนึ่งในวัฏจักรของน้ำ ภัยพิบัติจำนวนมากมีสาเหตุมาจากน้ำเป็นหลัก เช่น เมื่อฝนตกจำนวนมาก จะส่งผลต่อการเกิดอุทกภัย ดินถล่ม คลื่นลมแรง ในทางกลับกัน เมื่อฝนไม่ตกหรือตกน้อยกว่าปกติ จะส่งผลต่อการเกิดภัยแล้งในพื้นที่ ซึ่งภัยพิบัติทางน้ำหรือเกี่ยวข้องกับน้ำ จัดอยู่ในรายการภัยพิบัติทางธรรมชาติอันดับต้นๆ ที่ก่อเกิดความเสียหายมากที่สุดในรอบ 50 ปีที่ผ่านมา (Singlor, 2022) และยังมี การคาดการณ์ว่าภัยพิบัติทางน้ำจะมีความถี่และทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ไม่อาจสามารถคาดเดาได้ง่าย (WMO, 2021) ดังนั้นการพัฒนา หรือสร้างระบบเตือนภัยพิบัติต่างๆ ผ่านเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อใช้การติดตามและพยากรณ์สภาพอากาศ นั้นมีความสำคัญ และเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการภัยพิบัติทางน้ำของประเทศไทยได้อย่างมาก โดยเฉพาะในเรื่องการประมาณค่าติดตามหรือคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนที่แม่นยำ สามารถระบุ/หรือเจาะจงรายละเอียดในพื้นที่หนึ่งๆ ได้

ปัจจุบันการตรวจวัดปริมาณน้ำฝน ของกรมอุตุนิยมวิทยา แบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ (Thai Meteorological Department, n.d.) คือ 1) ตรวจวัดโดยสถานีอุตุนิยมวิทยา ผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำฝน เรียกว่า มาตรวัดน้ำฝน (Rain Gauge) ซึ่งเป็นภาชนะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ปากกระบอก มีกรวยรองรับน้ำฝนให้ตกลงสู่กระบอกตรง ใช้หน่วยวัดเป็น มิลลิเมตร (Mitrearth, 2021) และ 2) การตรวจวัดปริมาณน้ำฝนด้วยเรดาร์ (Radar) ตรวจอากาศ ทั้งนี้วิธีการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนแบบที่ 1 และ 2 เป็นวิธีการตรวจวัดที่มีข้อจำกัด ด้านความแม่นยำ และรายละเอียดเชิงพื้นที่ กล่าวคือ การใช้ข้อมูลมาตรวัดฝน สามารถตรวจวัดน้ำฝนได้เฉพาะในจุดที่ติดตั้ง แต่ปริมาณน้ำฝนในตำแหน่งข้างเคียงกัน อาจมีปริมาณไม่เท่ากัน ขณะที่ตำแหน่งของมาตรวัดฝนอยู่ห่างกัน จึงไม่อาจวัดหรือทราบปริมาณน้ำฝนที่แม่นยำในเชิงตำแหน่งได้ ส่วนเรดาร์ตรวจอากาศ เป็นการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่ไมโครเวฟไปยังวัตถุเป้าหมาย (ก้อนเมฆ หยดน้ำ) และพลังงานส่วนหนึ่งกระเจิงกลับมายังอุปกรณ์รับสัญญาณ เมื่อปะทะกับวัตถุเป้าหมาย ซึ่งบางครั้งมีค่าคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า เนื่องจากอนุภาคของน้ำหรือน้ำแข็งที่ลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ ไม่ทำให้เกิดฝนเสมอไป อีกทั้งการติดตั้งเรดาร์นั้นไม่ครอบคลุมในพื้นที่ประเทศไทย (TSRI, 2020) และวิธีที่ 3) การตรวจวัดปริมาณน้ำฝน โดยดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งเป็นการตรวจวัดสภาพอากาศจากระยะไกลลงมายังพื้นผิวโลก โดยใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถตรวจเมฆ ทิศทางการเคลื่อนตัวของเมฆ พายุหมุนเขตร้อน

ตรวจอุณหภูมิยอดเมฆ รวมถึงนำมาประมาณค่าปริมาณน้ำฝน (POSN, 2019) โดยเฉพาะดาวเทียม Himawari ของประเทศญี่ปุ่น มีองค์การจำนวนมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ นำข้อมูลจากดาวเทียม Himawari มาตรวจวัดปริมาณน้ำฝน และพยากรณ์อากาศ รวมถึงกรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย (Sakolnakhon, 2016)

จังหวัดนครสวรรค์เป็นจังหวัดที่ได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ทั้งอุทกภัยและภัยแล้ง เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน ปริมาณน้ำฝนมาก ผ่นวกกับน้ำเหนือที่ไหลบ่าผ่านจังหวัดส่งผลให้เกิดอุทกภัย ในทางตรงข้าม เมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง และฤดูร้อน สภาพอากาศจะค่อยๆ ร้อนและแห้งแล้ง ส่งผลให้ภัยแล้ง เกิดขึ้นสลับกันในทุกปี โดยเฉพาะภัยแล้ง จังหวัดนครสวรรค์เป็นจังหวัดภายใต้บัญชีพื้นที่เสี่ยงขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภค และการเกษตร เป็นผลจากมีพื้นที่ร้อยละ 78.26 ของจังหวัด มีการใช้ประโยชน์ที่ดิน ประเภทเกษตรกรรม (Land Development Department, 2020) และส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรอาศัยน้ำฝน มีพื้นที่เกษตรกรรมเพียงร้อยละ 12.90 ที่อยู่ในเขตชลประทาน (Warayuth, 2023) เมื่อฝนไม่ตก หรือตกน้อยกว่าปกติ จึงขาดแคลนน้ำเพื่อการเกษตร ส่งผลให้พืชผลทางการเกษตรได้ผลผลิตลดลง กระทั่งต่อรายได้ และคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในพื้นที่จังหวัดนครสวรรค์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้การตรวจวัดปริมาณน้ำฝนที่ไม่ครอบคลุม และเพียงพอ ซึ่งจังหวัดนครสวรรค์ มีสถานีอุตุนิยมวิทยาจำนวน 2 สถานี และตั้งอยู่ห่างกันกว่า 80 กิโลเมตร อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบริหารจัดการน้ำเพื่อการเกษตรได้ ความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลจากข้อมูลดาวเทียม Himawari-9 ซึ่งเป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของประเทศญี่ปุ่น มาประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันบริเวณจังหวัดนครสวรรค์ เพื่อเป็นประโยชน์สูงสุด โดยตรงกับเกษตรกร รวมถึงหน่วยงานภายในจังหวัดที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์ในการวิจัย

เพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวัน จากข้อมูลจากดาวเทียม Himawari-9 บริเวณ จังหวัดนครสวรรค์

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

1. ข้อมูลจากดาวเทียม Himawari-9 แบบ Full*-disk จากสำนักงานอุตุนิยมวิทยาประเทศญี่ปุ่น (Japan Meteorological Agency) ครอบคลุมพื้นที่ละติจูด 60 องศาเหนือ ถึง 60 องศาใต้ และลองจิจูด 80 องศาตะวันออก ถึง 180 องศาตะวันตก รายละเอียดเชิงพื้นที่ 2 กิโลเมตร ในช่วงวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 ตุลาคม พ.ศ. 2566 บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล netCDF4 ทุกๆ 10 นาที เข้าถึงแบบ Realtime ได้จาก FTP ชื่อ ftp.ptree.jaxa.jp ดัง Table 1

2. ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน จากสถานีอุตุนิยมวิทยานครสวรรค์ และสถานีอุตุนิยมวิทยาตากฟ้า สกษ. ในช่วงวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 ตุลาคม พ.ศ. 2566 จากกรมอุตุนิยมวิทยา

3. ข้อมูลขอบเขตการปกครองจังหวัดนครสวรรค์ จากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

Table 1 Imager specifications.

Himawari-9		
Band Number	Spatial Resolution at SSP [km]	Central Wave Length
1	1	0.47059
2	1	0.50993
3	0.5	0.63972
4	1	0.85668
5	2	1.6065
6	2	2.257
7	2	3.8289
8	2	6.2479
9	2	6.9555
10	2	7.3437
11	2	8.5936
12	2	9.6274
13	2	10.4074
14	2	11.208
15	2	12.3648
16	2	13.3107

วิธีการศึกษาวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการประมาณค่าปริมาณน้ำฝน จากข้อมูลจากดาวเทียม Himawari-9 โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิ ความสว่าง (Brightness Temperature) ของยอดเมฆ ช่วงคลื่นที่ 13 คือ 1) ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆกับปริมาณน้ำฝนรายวัน จากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 และวิเคราะห์ ถดถอย ทั้งแบบถดถอยเชิงเส้น และไม่ใช้เชิงเส้น ในโปรแกรม

Microsoft Excel เพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันโดยตรง และ 2) การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันจากข้อมูลจาก ดาวเทียม himawari-9 ด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน จำนวน 3 วิธี หลังจากนั้นสอบเทียบกับปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานี อุตุนิยมวิทยา สมการโดยวิธีการถดถอยเชิงเส้น มีขั้นตอน การศึกษาดังต่อไปนี้

1. การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันจากอุณหภูมิความ สว่างของยอดเมฆ

1.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิความสว่างรายวัน ตั้งแต่เวลา 00.00 น.-23.00 น. อ้างอิงตามเวลาสากลเชิงพิกัด (Universal Time Coordinated) UTC 0 เทียบเท่ากับเวลาในประเทศไทย 7.00 น.ของวันก่อน หน้าถึง 7.00 น.ของวันปัจจุบัน (UTC +7) รวม 24 ชุดข้อมูล มาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต โดยวิธีการหาค่าสถิติของจุดภาพ (Cell Statistic) จากตำแหน่งจุดที่ตั้งของสถานีอุตุนิยมวิทยา นครสวรรค์ และสถานีอุตุนิยมวิทยาตากฟ้า สกษ. โดยวิธีการ หาค่าสถิติแบบเฉพาะแถบ (Zonal Statistic) กับปริมาณน้ำฝน รายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของกรมอุตุนิยมวิทยา แสดง ตำแหน่งของจุดภาพและสถานีอุตุนิยมวิทยาดัง Figure 1

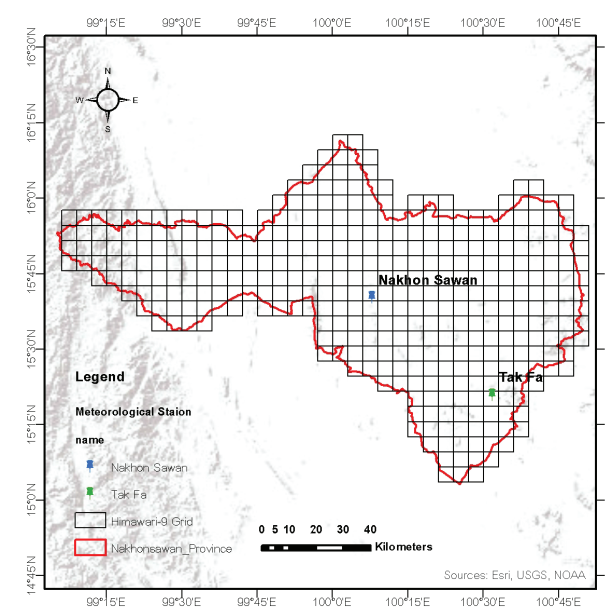


Figure 1 grid size of Himawari-9

1.1.1 การหาค่าผิดพลาดของชุดข้อมูล (Modified Thompson Tau Test) เป็นการหาค่าผิดพลาดของ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆกับปริมาณ น้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยาภายในจังหวัดนครสวรรค์ทั้ง 2 สถานี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยการใช้ค่า เฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($\bar{X}$) ของผลต่าง ระหว่างอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆกับปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ดังสมการ Equation 1

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (1)$$

เมื่อ
 $\sum x$ คือ ผลรวมทั้งหมดของผลต่างระหว่าง 2 ชุดข้อมูล

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 นำผลต่างของชุดข้อมูลลบด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตในขั้นตอนที่ 1 และแปลงเป็นค่าสัมบูรณ์ ดังสมการ Equation 2

$$\delta_i = |X_i - \bar{X}| \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) ของผลต่าง ระหว่างอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆกับปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ดังสมการ Equation 3

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า Tau เพื่อนำมาใช้คู่กับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในขั้นตอนที่ ดังสมการ Equation 4

$$\tau = \frac{t \cdot (n - 1)}{\sqrt{n} \sqrt{n - 2 + t^2}} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าสัมบูรณ์ δ_i กับค่า $\tau \cdot s$

ถ้า $\delta_i > \tau \cdot s$ หมายถึงข้อมูลชุดดังกล่าวมีค่าผิดปกติ

ถ้า $\delta_i < \tau \cdot s$ หมายถึงข้อมูลชุดดังกล่าวมีค่าไม่ผิดปกติ

1.1.2 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) (Pearson's correlation) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 เพื่อนำ

ชุดข้อมูลที่มีความสัมพันธ์มาสร้างแบบจำลอง ดังสมการ Equation 5

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (5)$$

เมื่อ

X คือ ปริมาณน้ำฝนรายวันจากข้อมูลดาวเทียม himawari-9

Y คือ ปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยา

1.1.3 การประมาณค่าปริมาณน้ำฝน โดยสมการถดถอย ระหว่างปริมาณน้ำฝนรายวัน บริเวณจังหวัดนครสวรรค์ ดังสมการ Equation 6 และ 7

$$Y = a + b(X) \quad (6)$$

และ

$$Y = a + b_1(X_1) + b_2(X_2) \quad (7)$$

เมื่อ

a คือ จุดตัดของแกน Y

b คือ ความลาดชัน (Slope) ของสมการ

2. การเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำฝน จากวิธีการประมาณค่าที่แตกต่างกัน

2.1 การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนแบบ Auto Estimator ที่พัฒนาโดย (Vicente & Vicente, 1998) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดาวเทียม GOES-8 และ 9 โดยการใช้อุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ (Cloud Top Brightness Temperature) กับข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศ ดังสมการ Equation 8

$$R = 1.1183 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-3.6382 \cdot 10^2 T^{1.2}) \quad (8)$$

2.2 การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนแบบ IMSRA ที่พัฒนาโดย (Gairola, 2011) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดาวเทียม KALPANA-IR โดยการใช้อุณหภูมิยอดเมฆกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากมาตรน้ำฝน ของสถานีอุตุนิยมวิทยา ดังสมการ Equation 9

$$R = 8.613098 \cdot \exp\left(-\frac{T - 197.97}{15.7061}\right) \quad (9)$$

2.3 การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนแบบ Non-Linear Relation ที่พัฒนาโดย (Suwarsono, 2009) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากดาวเทียม MTSAT-1R และปริมาณน้ำฝนจาก QMORPH ซึ่งเป็นการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการสังเกตการณ์จากดาวเทียมในวงโคจรต่ำโดยเฉพาะ ดังสมการ Equation 10

$$R = 2 * 10^{25} * T^{-10.256} \quad (10)$$

เมื่อ

R คือ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร/ชั่วโมง)

T คือ อุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ (Cloud Top Brightness Temperature)

2.4 การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) ระหว่างปริมาณน้ำฝนรายวันที่ได้จากดาวเทียม Himawari-9 ด้วยอัลกอริทึมที่แตกต่างกับปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดนครสวรรค์ ดังสมการ Equation 5

2.5 การสอบเทียบค่าปริมาณน้ำฝนรายวัน จากดาวเทียม Himawari-9 กับปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดนครสวรรค์ ดังสมการที่ Equation 6

3. การประเมินประสิทธิภาพของสมการในการประมาณค่า

3.1 การประเมินค่าคลาดเคลื่อน RMSE (Root Mean Square Error) ของแบบจำลอง ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากการพยากรณ์กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ดังสมการ Equation 11

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (11)$$

3.2 การประเมินค่าคลาดเคลื่อน MAD (Mean Absolute Deviation) ของแบบจำลอง ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากการพยากรณ์กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยา ดังสมการ Equation 12

$$MAD = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (12)$$

เมื่อ

y_i คือ ค่าปริมาณน้ำฝนจากสถานีอุตุนิยมวิทยาตำแหน่งที่ i

$\hat{y}_i$ คือ ค่าประมาณน้ำฝนจากการพยากรณ์ของสมการตำแหน่งที่ i

N คือ จำนวนตัวอย่างที่ใช้

ผลการศึกษา

1. การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวันจากอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ จากดาวเทียม Himawari-9 โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ ช่วงคลื่นที่ 13 กับข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน จากสถานีอุตุนิยมวิทยา จำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยานครสวรรค์ และสถานีอุตุนิยมวิทยาตากฟ้า สกษ. จำนวน 329 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผัน ในระดับปานกลาง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 มีค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) เท่ากับ -0.6755 อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆลดลง ปริมาณน้ำฝนรายวันจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนผ่านสมการถดถอยเชิงเส้น ผลการศึกษา พบว่า สมการถดถอยแบบ Polynomial มีค่าสหสัมพันธ์ r เท่ากับ 0.711 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.505 อธิบายได้ว่าอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆสามารถพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายวันร้อยละ 50.50 ส่วนที่เหลือเป็นผลมาจากปัจจัยอื่น เช่น ความเร็วลม ทิศทางลม ความชื้นในอากาศ ฯลฯ โดยสมการมีค่าคลาดเคลื่อน RMSE ในการประมาณค่า เท่ากับ 7.61 มิลลิเมตร/วัน ค่าคลาดเคลื่อน MAD เท่ากับ 3.70 มิลลิเมตร/วัน รายละเอียดดัง Table 2 และ Figure 2 และสามารถประมาณค่าได้จากสมการ Equation 13 และแสดงตัวอย่างปริมาณน้ำฝนได้ดัง Figure 3

$$R = 798.31 - 5.402(tbb_{13}) + 0.0091(tbb_{13})^2 \quad (13)$$

เมื่อ

R คือ ปริมาณน้ำฝนรายวัน (มิลลิเมตร/วัน)

Tbb_{13} คือ อุณหภูมิความสว่างช่วงคลื่นที่ 13 หน่วยเคลวิน

Table 2 Regression statistics for estimating rainfall from brightness temperature band 13

Model	Linear	Polynomial
R	0.675	0.711
R Square	0.456	0.505
Adjusted R	0.455	0.502
RMSE	7.98	7.61
MAD	4.76	3.70

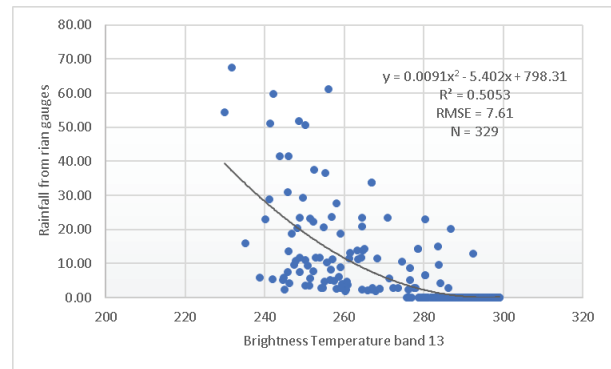
2. การเปรียบเทียบค่าวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝน โดยการใช้ข้อมูลภูมิความสว่างของยอดเมฆเป็นฐาน ได้แก่ 1) การประมาณค่าด้วยวิธี Auto Estimator (AE) การประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม IMSRA และ การประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม Non-Linear Relation (NL) และศึกษาความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนรายวัน จากสถานีอุตุนิยมวิทยา ผลการศึกษาพบว่า การประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม ทั้ง 3 วิธี มีความสัมพันธ์แบบแปรผันในระดับปานกลางถึงสูง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ซึ่งวิธีการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม NL มีค่าสหสัมพันธ์ r สูงสุด เท่ากับ 0.7163 รองลงมาคือ วิธีการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม AE มีค่าสหสัมพันธ์ r เท่ากับ 0.7069 และวิธีการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม IMSRA มีค่าสหสัมพันธ์ r ต่ำสุด เท่ากับ 0.5921 ดัง Table 3

Table 3 The relationship between rainfall from satellite data and rainfall from rain gauges

Method	Rainfall	AE	IMSRA	NLR
Rainfall	1			
AE	0.7069**	1		
IMSRA	0.5921**	0.8815**	1	
NLR	0.7163**	0.9852**	0.79560**	1

** Correlation is significant at the 0.01 level

ผลการสอบเทียบวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝน บริเวณจังหวัดนครสวรรค์ จากการนำอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆเป็นฐานด้วยวิธีการถดถอย พบว่าปริมาณน้ำฝนรายวันที่จากวิธีการประมาณค่าแบบ NLR มีค่า R^2 สูงสุด เท่ากับ 0.51 มีค่าคลาดเคลื่อน RMSE และค่าคลาดเคลื่อน MAD น้อยที่สุด เท่ากับ +7.55 และ 3.84 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ รองลงมาคือปริมาณน้ำฝนที่ได้รับจากวิธีการประมาณค่าแบบ AE มีค่า R^2 เท่ากับ 0.498 และมีค่าคลาดเคลื่อน RMSE และค่าคลาดเคลื่อน MAD เท่ากับ +7.65 และ 3.95 มิลลิเมตร/วัน

**Figure 2** The relationship between brightness temperature and rainfall from rain gauges

ตามลำดับ และวิธีการประมาณค่าแบบ IMSRA มีค่า R^2 เท่ากับ 0.350 และมีค่าคลาดเคลื่อน RMSE และค่าคลาดเคลื่อน MAD สูงที่สุดเท่ากับ +8.72 และ 5.16 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ ดัง Table 4

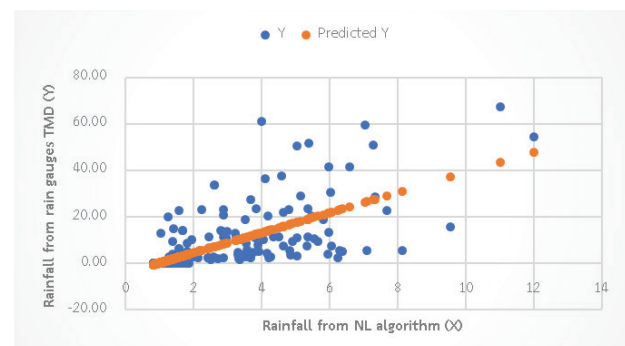
ดังนั้นวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนจากดาวเทียม Himawari-9 บริเวณจังหวัดนครสวรรค์ ที่เหมาะสมที่สุดและให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ การนำอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ ช่วงคลื่นที่ 13 เข้าสู่สมการประมาณค่าแบบ NLR หลังจากนั้นจึงสอบเทียบชุดข้อมูลด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นแสดงดังสมการ Equation 14 และ Figure 3 สามารถแสดงตัวอย่างการประมาณค่า ดัง Figure 6 และ Figure 7

$$Y = -4.068 + 4.324(X) \quad (14)$$

เมื่อ

Y คือ ปริมาณน้ำฝนรายวัน จากสถานีอุตุนิยมวิทยา

X คือ ปริมาณน้ำฝนรายวัน จากการประมาณค่าด้วยวิธี NLR

**Figure 3** The relationship between rainfall from NLR and rainfall from rain gauges

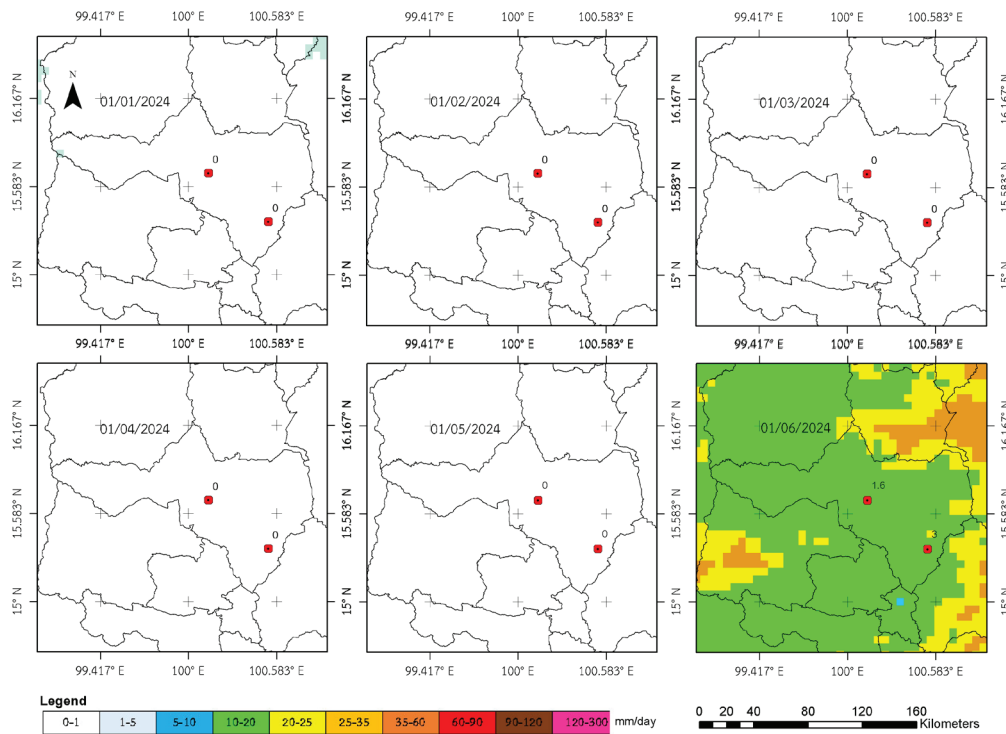


Figure 4 Some examples of rainy days on the 1st day of each month from January to June 2024 using the NLR method

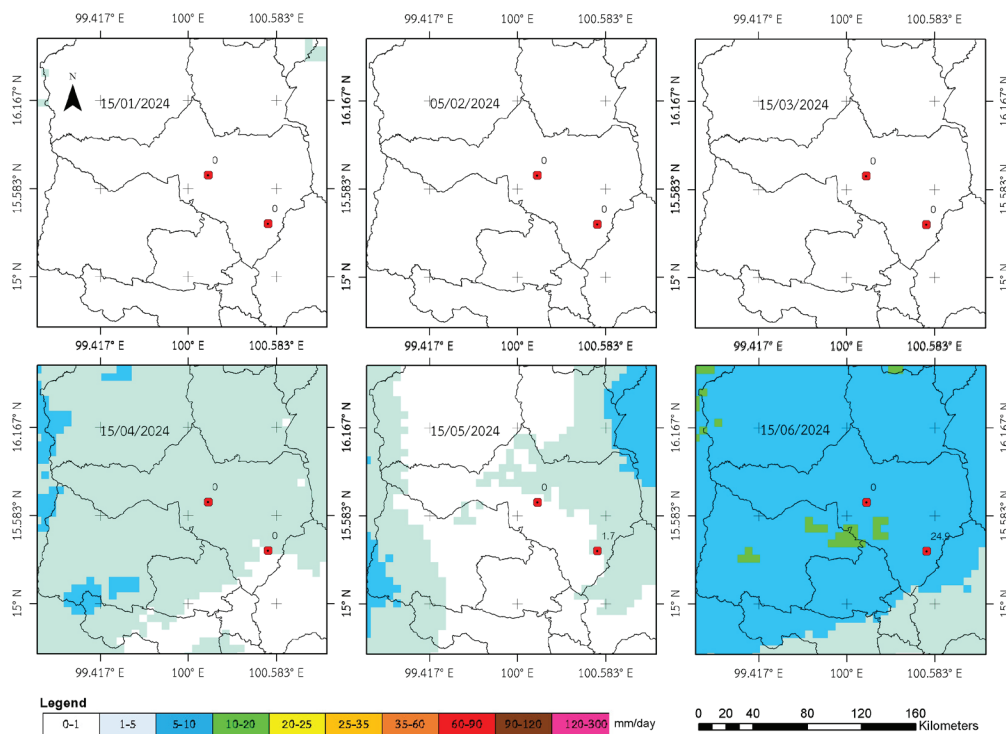


Figure 5 Some examples of rainy days on the 15th of each month from January to June 2024 using the NLR method

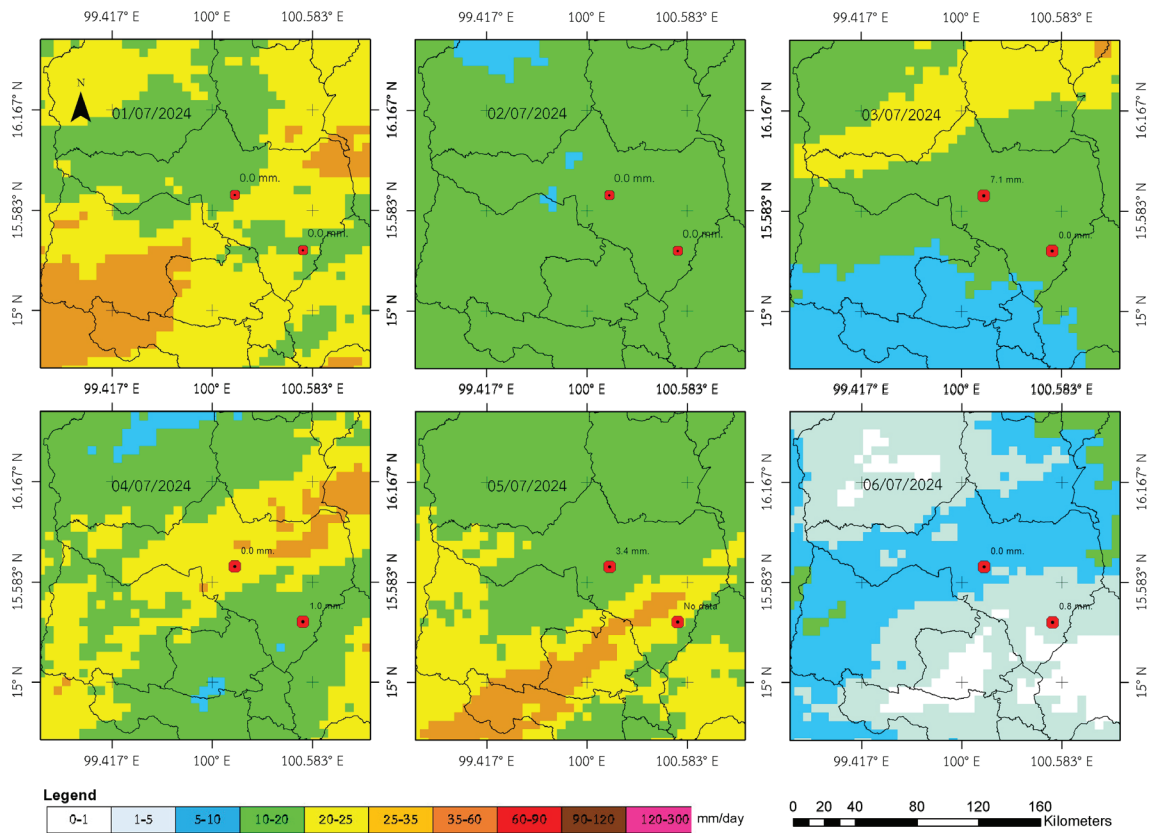


Figure 6 Some examples of rainy days between 1 and 6 July 2024 using the Polynomial method

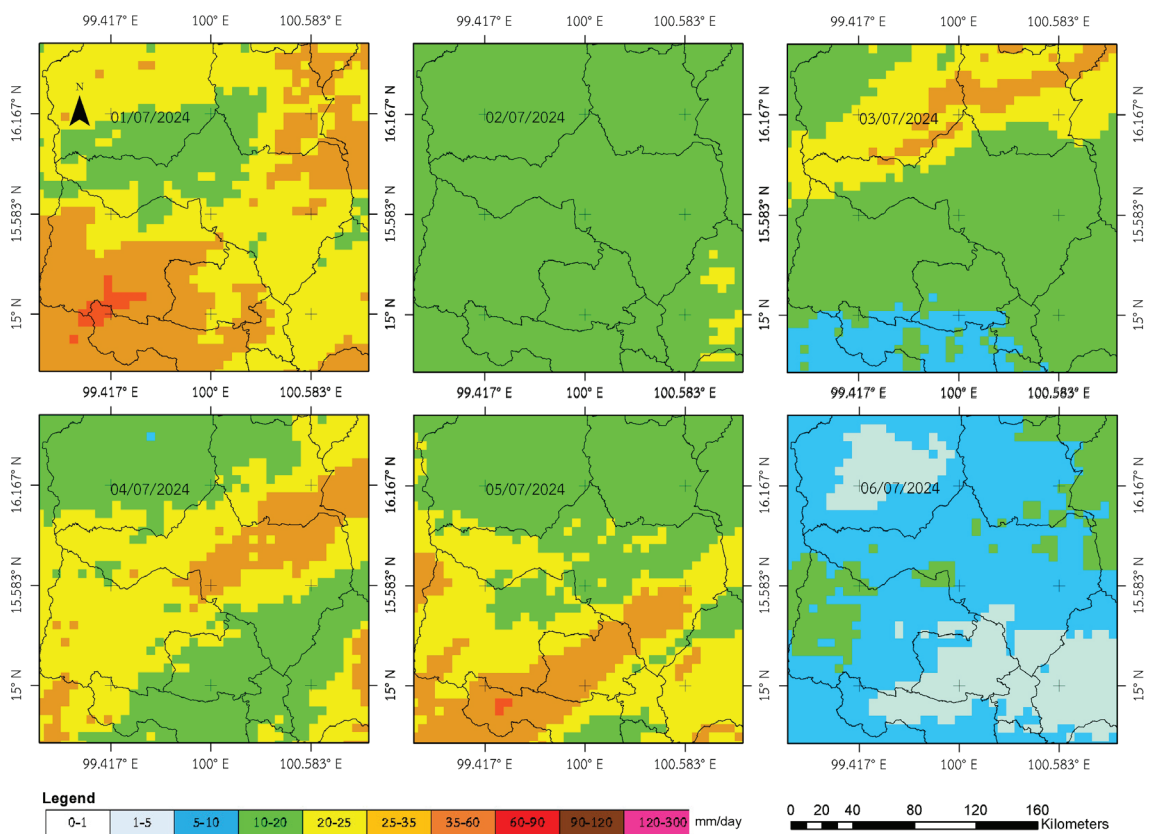


Figure 7 Some examples of rainy days between 1 and 6 July 2024 using the NLR method

จาก Figure 4 และ 5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในช่วงวันที่ 1 และ วันที่ 15 ของเดือนมกราคมถึง มิถุนายน พ.ศ. 2567 วิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนแบบ NLR มีความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในบริเวณที่ฝนไม่ตก หรือตกในปริมาณน้อย เหมาะสมแก่การนำมาใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการน้ำ วางแผนทางด้านการเกษตรกรรม โดยเฉพาะการป้องกันและผลกระทบจากภัยแล้ง หรือนำไปใช้เป็นปัจจัยในการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งได้ ส่วนในช่วงฤดูฝน สภาพอากาศแปรปรวน ส่งผลให้ความแม่นยำในการประมาณค่าลดลง ดัง Figure 6 และ 7

Table 4 Statistics for adjusted rainfall from satellite data

Method	R ²	RMSE	MAD	Equation
AE	.498	+7.65	3.95	$R = -0.1104 + 52.325(R_{AE})$
IMSRA	.350	+8.72	5.16	$R = 2.9672 + 41.070(R_{IMSRA})$
NLR	.510	+7.55	3.84	$R = -4.068 + 4.324 (R_{NLR})$

สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ต้องการนำเสนอวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวัน บริเวณจังหวัดนครสวรรค์ ด้วยข้อมูลจากดาวเทียม Himawari-9 ซึ่งเป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาของประเทศญี่ปุ่น ด้วยวิธีการประมาณค่าที่แตกต่างกัน 4 วิธี คือ 1) ประมาณค่าจากอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆจากสมการเชิงประจักษ์ (Empirical Equation) 2) การประมาณค่าแบบ AE 3) การประมาณค่าแบบ IMSRA และ 4) การประมาณค่าแบบ NLR มาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ สอบเทียบและประเมินค่าคลาดเคลื่อนกับปริมาณน้ำฝนรายวันจากสถานีอุตุนิยมวิทยา โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 ตุลาคม พ.ศ. 2566 ทั้งในช่วงที่ฝนไม่ตก ปริมาณน้ำฝนต่ำสุด 0 มิลลิเมตร ฝนตกเล็กน้อย ฝนตกปานกลาง ปริมาณน้ำฝนสูงสุด 66.7 มิลลิเมตร และนำวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด มาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับประมาณค่าปริมาณน้ำฝนรายวัน จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึม NL มีความเหมาะสมที่สุด จากวิธีการทั้งหมด มีค่าคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ ± 7.55 มิลลิเมตร/วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ayasha, 2020) ที่ได้เปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนโดยใช้ดาวเทียม Himawari-8 ในภูมิภาคที่แตกต่างกันของประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งวิธีการประมาณค่าแบบ NLR ในบริเวณที่ฝนตกปานกลางมีค่าคลาดเคลื่อน RMSE ประมาณ $\pm 6-7$ มิลลิเมตร/วัน และเมื่อ

ฝนตกหนักมากกว่า 180 มิลลิเมตร/วัน ค่าคลาดเคลื่อน RMSE มีค่าประมาณ ± 25 มิลลิเมตร/วัน อนุมานได้ว่าอัลกอริทึมสามารถประมาณค่าปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ฝนไม่ตก หรือฝนตกปานกลาง ได้ดีกว่าบริเวณฝนตกหนัก ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากการใช้อุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆเพียงอย่างเดียว แต่การที่ฝนจะตกนั้นอาจมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น อิทธิพลของลมที่ทำให้เม็ดฝนไม่ตกลงในมาตรวัดน้ำฝน ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิของอากาศ (Thai Meteorological Department, n.d.) หรืออาจเป็นผลมาจากการเครื่องมือวัดในสถานีอุตุนิยมวิทยา มีค่าคลาดเคลื่อน

ทั้งนี้การนำแบบจำลองมาประมาณค่าปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลดาวเทียม Himawari-9 บริเวณจังหวัดนครสวรรค์ เพื่อสนับสนุนงานทางด้านภัยแล้ง สามารถให้รายละเอียดเชิงพื้นที่ที่ดีที่สุด 2 กิโลเมตร ครอบคลุมทุกพื้นที่ในจังหวัดนครสวรรค์ อีกทั้งช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งเป็นฤดูกาลที่ฝนไม่ตกข้อมูลจากแบบจำลองสามารถประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

1. การสอบเทียบปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลดาวเทียมและสถานีอุตุนิยมวิทยา เพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุมและแม่นยำมากขึ้น ควรใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันย้อนหลังอย่างน้อย 5 ปี เพื่อให้ชุดข้อมูลกระจายตัว ทั้งในช่วงที่ฝนไม่ตก ฝนตกเล็กน้อย ฝนตกปานกลาง ฝนตกหนัก ฝนตกหนักมาก ในทุกช่วงฤดูกาล

2. แบบจำลองจากงานวิจัยนี้ยังไม่เหมาะสมกับการงานด้านอุทกภัยหรือดินถล่ม เนื่องจากมีค่าคลาดเคลื่อนมาก อีกทั้งเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อนที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของประชาชน การศึกษาครั้งต่อไปจึงควรมีการนำปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องและสามารถตรวจวัดด้วยดาวเทียม เช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความกดอากาศ มาใช้ร่วมกับอุณหภูมิความสว่างของยอดเมฆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) ที่สนับสนุนทุนงบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2566

เอกสารอ้างอิง

Ayasha, N. (2020). A comparison of rainfall estimation using Himawari-8 satellite data in different Indonesian topographies. *International Journal of Remote Sensing and Earth Science*, 17(2), 194.

- Gairola, R. V. (2011). Development of rainfall estimation algorithms for monitoring rainfall events over India using KALPANA-IR measurements on various temporal and spatial scales. In *Proceedings of the 38th Meeting of the Coordination Group of Meteorological Satellites*. New Delhi, India.
- Vicente, G. A., & Vicente, R. A. (1998). The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(9), 1186.
- Sakolnakhon, K. P. (2016). The estimation rainfall using infrared (IR) band of Himawari-8 satellite over Thailand. *Environmental Science*.
- Land Development Department. (2020). Land use of Nakhonsawan Province. Retrieved from http://www1.idd.go.th/web_OLP/Lu_63/Lu63_N/NSN2563.htm
- Mitrearth. (2021, January 26). Precipitation: It's not just rain and snow. Retrieved May 05, 2024, from <https://www.mitrearth.org/23-3-precipitation/>
- POSN. (2019). *Meteorology*. Bangkok, Thailand: Darnsutha Press Co. Ltd.
- Singlor, T. (2022, January 12). Water-related disasters: Top destructive hazards to occur frequently and intensely. *SDG MOVE*. Retrieved from <https://www.sdgmovement.com/2021/07/30/water-related-disasters-top-destructive-hazards-to-occur-frequently-intensely/>
- Suwarsono, P. K. (2009). Penentuan hubungan antara suhu kecerahan data MTSAT dengan curah hujan data QMORPH. *Jurnal Penginderaan Jauh*, 6, 39.
- Thai Meteorological Department. (n.d.). *Daily rainfall*. Retrieved May 05, 2024, from <http://www.arcims.tmd.go.th/dailydata/DetailDailyRain.html>
- Thai Meteorological Department. (n.d.). *Frequently asked questions*. Retrieved from <https://tmd.go.th/info/faq>
- Thailand Science Research and Innovation (TSRI). (2020, March 11). Algorithm for estimation rainfall from satellite image: Precision, fast and extensive. *Research Cafe*. Retrieved from <https://researchcafe.tsri.or.th/worldmeteorology-application/>
- Warayuth, P. (2023, April 18). Nakhonsawan today's drought analysis. *Provincial Statistical Office*. Retrieved from <https://nksawan.nso.go.th/?view=article&id=154:today-s-drought-analysis&catid=58>
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate, and Water Extremes (1970–2019)*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

การเตรียมและศึกษาความคงตัวในการเก็บรักษาซีรัมเสมือนจริง สำหรับการตรวจกรองแอนติบอดีโดยวิธีหลอดทดลองและวิธีคอลัมน์แอกกลูตินเนชัน

Preparation and storage stability of virtual serum for antibody screening by conventional tube test and column agglutination test

อังสนา โยธินารักษ์¹ และ จิราภรณ์ เกตุดี^{1*}
Aungsana Yothinarak¹ and Jiraporn Gatedee^{1*}

Received: 29 May 2024 ; Revised: 26 August 2024 ; Accepted: 18 September 2024

บทคัดย่อ

การเรียนการสอนภาคปฏิบัติการในวิชาวิทยาศาสตร์การบริการโลหิตของคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต เรื่อง การตรวจกรองแอนติบอดี ต้องมีการเตรียมสิ่งตัวอย่างที่ให้ผลการตรวจกรองแอนติบอดีเป็นลบและบวก แต่มีข้อจำกัดคือต้องใช้เลือดจากผู้ป่วยในปริมาณมากเพื่อนำมาปั่นแยกซีรัมออกมา จึงจะเพียงพอต่อนักศึกษาที่จะปฏิบัติจริง ซึ่งซีรัมเป็นสิ่งตัวอย่างที่อาจเสี่ยงต่อโรคติดต่อ ได้แก่ เชื้อไวรัสตับอักเสบบี ไวรัสตับอักเสบบีและเชื้อไวรัสเอชไอวี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาความคงตัวของซีรัมเสมือนจริง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 และ -20 องศาเซลเซียส สำหรับการตรวจกรองแอนติบอดี การเตรียมซีรัมเสมือนจริงที่ให้ผลการตรวจกรองแอนติบอดีเป็นลบและบวก ทำโดยนำผงเก๊กฮวย โซเดียมคลอไรด์ อัลบูมิน ละลายในน้ำกลั่น เติมน้ำสีเหลืองไข่ ผสมจนสารละลายละลายเข้ากัน จากนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่ากัน และเติม anti-D (IgG) ที่อัตราส่วนการเจือจางเท่ากับ 1: 8 เพื่อทำเป็นซีรัมเสมือนจริงแบบให้ผลการตรวจกรองแอนติบอดีเป็นบวก ส่วนซีรัมเสมือนจริงแบบให้ผลการตรวจกรองแอนติบอดีเป็นลบจะไม่เติม anti-D (IgG) แบ่งใส่หลอดทดลอง เพื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 และ -20 องศาเซลเซียส ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และตรวจกรองแอนติบอดี ด้วยวิธีหลอดทดลองและวิธีคอลัมน์แอกกลูตินเนชัน ทุกๆ 3 วัน เป็นเวลา 27 วัน (วันที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 และ 27) โดยทำการเปรียบเทียบผลการตรวจกรองแอนติบอดีกับค่าเริ่มต้น (วันที่ 0) ผลการทดลองพบว่าซีรัมเสมือนจริง ที่เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีความคงตัวของลักษณะทางกายภาพดีกว่าเก็บที่ 2 - 8 องศาเซลเซียส และการเก็บทั้งสองอุณหภูมิให้ผลการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธีหลอดทดลองและวิธีคอลัมน์แอกกลูตินเนชันเป็นลบและบวกจริงในทุกครั้งที่ทำการทดสอบ ผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการเตรียมซีรัมเสมือนจริง ที่ปลอดภัย ไม่เสี่ยงต่อโรคติดต่อ เพื่อใช้ในการเรียนการสอนภาคปฏิบัติการ เรื่อง การตรวจกรองแอนติบอดี

คำสำคัญ: ซีรัมเสมือนจริง, แช่เย็น, แช่แข็ง, การตรวจกรองแอนติบอดี, ความคงตัว

Abstract

This article is a study on the topic of the antibody screening requirements when preparing negative and positive samples for testing at the transfusion science laboratory at the Faculty of Medical Technology, Rangsit University. However, there is a limitation with regard to the need for a large quantity of patient blood samples in order to separate serum, so that there is sufficient for the students to use in their practices. In addition, serum samples have the risk of infectious diseases, such as hepatitis B virus, hepatitis C virus and human immunodeficiency virus. The purpose of this research is to examine the stability of virtual serum stored at temperatures of 2 - 8 and -20 °C for antibody screening. Preparing a virtual serum for both negative and positive antibody screening is conducted by using chrysanthemum powder, sodium chloride, albumin, and dissolving them in distilled water, then adding yellow coloring and finally mixing until the solution is well blended. Next, the serum is divided into two equal parts and anti-D (IgG) is added to the virtual serum at a dilution ratio of 1:8 to obtain a positive result, while the virtual serum that gives a negative result

¹ คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต

¹ Faculty of Medical Technology, Rangsit University

* Corresponding author: E-mail: jiraporn.g@rsu.ac.th

will not have any anti-D (IgG). The virtual serum was then aliquoted for storage at 2 - 8 °C and -20 °C. The physical examination, antibody screening using a conventional tube test (CTT) and a column agglutination test (CAT) were assayed every 3 days for 27 days (day 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, and 27) and then the results were compared with the baseline (day 0). The results showed that virtual serum stored at -20 °C had a greater physical stability than when it was stored at 2 - 8 °C. The storage of virtual serum at both temperatures gave true negative and true positive results for antibody screening with CAT and CTT on the day of the testing. This study may provide a way of preparing virtual serum for antibody screening that is safe, non-infectious, and suitable for students' laboratory practice.

Keywords: Virtual Serum, refrigerate, frozen, antibody screening, stability

บทนำ

การเรียนการสอนในภาคปฏิบัติการ วิชา วิทยาศาสตร์การบริการโลหิต 1 ของคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต มีหัวข้อเรื่อง antibody screening ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อตรวจหา unexpected antibodies ที่มีความสำคัญทางด้านคลินิก โดยทำในกลุ่มต่างๆ ได้แก่ ผู้บริจาคโลหิต ผู้ป่วยที่จะรับเลือด ผู้ป่วยที่เกิดปฏิกิริยาอันไม่พึงประสงค์จากการรับเลือด หญิงมีครรภ์ที่มีประวัติว่าเคยมีบุตรตาเหลือง ตัวเหลือง มีประวัติการแท้ง หรือได้รับเลือดมาก่อนตั้งครรภ์แล้วหลายครั้ง (Tholpady, 2016; ภาวิณี คุปตวินทุ และคณะ, 2553) การทดสอบดังกล่าว ต้องมีการใช้สิ่งตัวอย่างชนิดซีรัม ซึ่งการเตรียมสิ่งตัวอย่างชนิดซีรัมเพื่อใช้ในการเรียนการสอนภาคปฏิบัติการ มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้เลือดครบส่วนปริมาณมากเพื่อนำมาปั่นแยกซีรัมออกมา จึงจะเพียงพอต่อนักศึกษาชั้นปีที่ 3 จำนวน 200 คน ทั้งนี้การเจาะเลือดจากมนุษย์ในปริมาณมากไม่สามารถทำได้ เพราะอาจเป็นอันตรายต่อผู้ถูกเจาะ นอกจากนี้ unexpected antibodies ในบางกลุ่มประชากรพบได้น้อย โดยมีการพบได้ร้อยละ 0.3 - 38.0 การพบร้อยละที่แตกต่างกันนั้นขึ้นกับกลุ่มประชากรและวิธีการทดสอบที่ใช้ (Roback, 2008) และซีรัมยังเป็นสิ่งตัวอย่างที่อาจเสี่ยงต่อโรคติดต่อจากการรับเลือด ได้แก่ เชื้อตับอักเสบบี ซีและเชื้อเอชไอวี (HBV, HCV, HIV) (ภัทรพร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2548) ซึ่งมีอันตรายต่อนักศึกษาที่ทำการฝึกตรวจ antibody screening

ปี 2560, 2561, 2564 มีการวิจัยเพื่อพัฒนาการเตรียมซีรัมเสมือนจริงสำหรับการตรวจกรอง unexpected antibodies เพื่อใช้ในการเรียนการสอนภาคปฏิบัติการ วิชา วิทยาศาสตร์การบริการโลหิต 1 ของคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต โดยเป็นการเตรียมสารละลายให้เป็นซีรัมเสมือนจริง ที่ไม่ยุ่งยาก หาซื้อสารและน้ำยาได้ง่าย ราคาไม่แพง และนำมาทำเป็นสิ่งตัวอย่างที่ให้ผลเป็นลบและบวกในการทดสอบ antibody screening ผลที่ได้ทำให้ผู้สอนมีทางเลือกที่จะเตรียมสารละลายซีรัมเสมือนจริงเพื่อทดแทนการใช้ pooled serum หรือ frozen plasma ที่ได้จากมนุษย์ อย่างไรก็ตาม หากมีการเตรียมซีรัมเสมือนจริงสำหรับใช้ในการเรียนการสอนเรื่อง

antibody screening ในปริมาณมาก และสามารถเก็บรักษาไว้ได้ โดยคุณลักษณะของซีรัมเสมือนจริง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของซีรัมเสมือนจริงและติดตามผลของ antibody screening ที่ให้ผลการทดสอบเป็นลบและบวกโดย conventional tube test (CTT) และ column agglutination technique (CAT) เมื่อเก็บซีรัมเสมือนจริงที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 27 วัน

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมซีรัมเสมือนจริง

1.1 การเตรียมซีรัมเสมือนจริงแบบให้ผลการทดสอบ antibody screening เป็นลบ ดังนี้

ซึ่งผงเกลือ 36 กรัม, NaCl 5.1 กรัม อัลบูมิน 0.6 กรัม และละลายสารในน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร เติมน้ำสีเหลืองไข่ 900 ไมโครลิตร ผสมจนสารละลายละลายเข้ากัน รายงานลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่าทางด้านสี ความขุ่น การเกิดก้อนหรือเจล และตรวจสอบแบคทีเรียและเชื้อราภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จากนั้นทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT และ CAT และตรวจสอบผลการทดลองว่าให้ผลเป็นลบทุกสถานะของการทดสอบ (RT, 37 องศาเซลเซียส และ antiglobulin phase) แบ่งใส่หลอดทดลอง นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส

1.2 การเตรียมซีรัมเสมือนจริงแบบให้ผลการทดสอบ antibody screening เป็นบวก ดังนี้

เตรียมซีรัมเสมือนจริง ทำนองเดียวกับข้อ 1.1 และเติม anti-D (IgG) ที่อัตราส่วนการเจือจางเท่ากับ 1: 8 ด้วยซีรัมเสมือนจริง ผสมจนสารละลายเข้ากัน รายงานลักษณะทางกายภาพ ด้านสี ความขุ่นการเกิดก้อนหรือเจล และตรวจสอบแบคทีเรียและเชื้อราภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จากนั้นทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT และ CAT

และตรวจสอบผลการทดลองว่าให้ผลเป็นบวกที่ antiglobulin phase แบ่งใส่หลอดทดลอง นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส

1.3 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

จากซีรัมเสมือนจริงที่เตรียมขึ้นในข้อ 1.1 และ 1.2 นำมาทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่า ได้แก่ การตรวจสอบสี ความขุ่น และตรวจสอบแบคทีเรียและเชื้อรา ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า (objective len 40X) ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 27 วัน (วันที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 และ 27) โดยผู้วิจัย 2 คนและทำการเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (วันที่ 0)

2. การทดสอบ antibody screening

2.1 วิธี conventional tube test (CTT)

ซีรัมเสมือนจริงที่เตรียมขึ้นในข้อ 1.1 และ 1.2 ที่ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส โดยซีรัมเสมือนจริงที่เก็บที่ -20 องศาเซลเซียส ได้นำมาละลายภายใต้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำมาปั่นที่ 3,000 rpm นาน 5 นาที ก่อนทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT (ฝ่ายผลิตน้ำยาแอนติซีรัมและผลิตภัณฑ์เซลล์ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย, 2567) ทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 27 วัน (วันที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 และ 27) โดยแต่ละวันที่ทดสอบ จะทำ antibody screening แบบซ้ำสามครั้ง (triplicate) และทำการเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (วันที่ 0) ดังนี้ เตรียมหลอดทดลองขนาด 10 x 75 มม. จำนวน 2 หลอด เขียนกำกับแต่ละหลอดเป็น O1 และ O2 เติมซีรัมเสมือนจริง 2 หยด ลงในแต่ละหลอด หยด screening cells O1 และ O2 ให้ตรงกับที่เขียนกำกับข้างหลอด เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที ปั่นอ่านผล 20 วินาที โดยดูปฏิกิริยาการแตกสลายของเม็ดเลือดแดง (hemolysis) จากนั้นให้เขย่าหลอดทดลองเพื่อดูปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) บันทึกผลที่อุณหภูมิห้อง (RT) อันที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปั่นอ่านผล 20 วินาที โดยดูปฏิกิริยาการแตกสลายของเม็ดเลือดแดง (hemolysis) จากนั้นให้เขย่าหลอดทดลองเพื่อดูปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) บันทึกผลที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ปั่นล้างเซลล์เม็ดเลือดแดงด้วย normal saline solution (NSS) จำนวน 3 ครั้ง ครั้งสุดท้ายสลับ NSS ออกจนหมด หยด anti-human globulin reagent 2 หยด เขย่าให้เซลล์เม็ดเลือดแดงผสมกับน้ำยา ปั่นอ่านผล 20 วินาที เขย่าหลอดทดลองเพื่อดูปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) ด้วยตาเปล่า ถ้าไม่พบปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) ให้ดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ บันทึกผลที่ indirect antiglobulin test (IAT)

การควบคุมคุณภาพของ antiglobulin test: หยด Coombs' Control Cells (CCC) 1 หยด ลงในหลอดที่ให้ผลของการทดสอบเป็นลบ ปั่นอ่านผลอีกครั้ง ถ้าให้ผลบวก คือ มีปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) แสดงว่าขั้นตอนการล้างเซลล์เม็ดเลือดแดงถูกต้อง น้ำยา anti-human globulin มีคุณภาพดี ออกผลการทดสอบที่ IAT ว่า เป็นลบจริง แต่ถ้าให้ผลลบ คือ ไม่มีปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง แสดงว่าขั้นตอนการล้างเซลล์เม็ดเลือดแดงไม่ถูกต้อง หรือน้ำยา anti-human globulin ไม่มีคุณภาพ ต้องทำการทดสอบใหม่ตั้งแต่นั้น

การอ่านผลการทดสอบ

การอ่านผลปฏิกิริยาการแตกสลายของเม็ดเลือดแดง (hemolysis) มีรายละเอียด ดังนี้

PH มีการแตกสลายของเม็ดเลือดแดงบางส่วน (partial hemolysis) น้ำเป็นสีแดง มี เซลล์ เม็ดเลือดแดง เหลืออยู่ที่ก้นหลอดทดลอง

H มีการแตกสลายของเม็ดเลือดแดงอย่างสมบูรณ์ (complete hemolysis) น้ำเป็นสีแดง ไม่มีเซลล์ เม็ดเลือดแดง เหลืออยู่ที่ก้นหลอดทดลอง

การอ่านผลปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง (agglutination) มีรายละเอียด ดังนี้

4+ เม็ดเลือดแดงจับกลุ่มเป็นก้อนใหญ่ก้อนเดียว น้ำใส

3+ เม็ดเลือดแดงจับกลุ่มเป็นก้อนใหญ่หลายก้อน น้ำใส

2+ เม็ดเลือดแดงจับกลุ่มเป็นก้อนขนาดกลางหลายก้อน น้ำใส

1+ เม็ดเลือดแดงจับกลุ่มเป็นก้อนขนาดเล็กหลายก้อน น้ำขุ่นและมีสีแดง

W เม็ดเลือดแดงกระจายตัวสม่ำเสมอด้วยตาเปล่า เกือบไม่เห็นการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง จะเห็นได้ชัดเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ น้ำขุ่นและมีสีแดง

0 ไม่พบการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง น้ำขุ่นเป็นเนื้อเดียวกันและมีสีแดง

2.2 วิธี column agglutination technique (CAT)

ซีรัมเสมือนจริงที่เตรียมขึ้นในข้อ 1.1 และ 1.2 ที่ทำการเก็บอุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส โดยซีรัมเสมือนจริงที่เก็บที่ -20 องศาเซลเซียส ได้นำมาละลายภายใต้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง จากนั้น นำมาปั่นที่ 3,000 rpm นาน 5 นาที ก่อนทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CAT (Raos *et al.*, 2018) ทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 27 วัน (วันที่ 0,

3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 และ 27) และทำการเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (วันที่ 0) ดังนี้ หยด 50 μ l ของ 1% O1 และ O2 ลงใน microcolumn AHG และหยดซีรัมเสมือนจริงลงในแต่ละ microcolumn หลอดละ 25 μ l อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ปั่นนาน 5 นาที อ่านผล และบันทึกผลการทดลอง

การอ่านผลการทดสอบ

ระดับความแรงของปฏิกิริยาจับกลุ่มในวิธี CAT สามารถอ่านผลได้เป็น 4+, 3+, 2+, 1+ และ negative ดังแสดงใน Figure 1

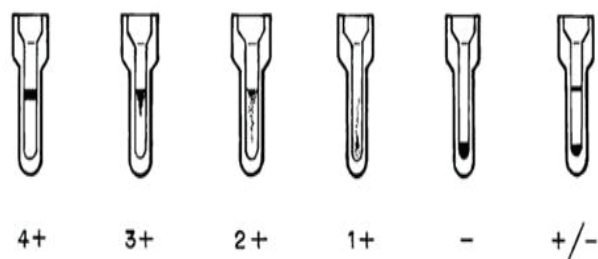


Figure 1 Reading the results of antibody screening by column agglutination technology

ผลการทดลอง

ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของซีรัมเสมือนจริงที่ให้ผล antibody screening เป็นลบและบวก เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 27 วัน โดยมีการศึกษา สี ความขุ่น และอนุภาคที่พบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ทุกๆ 3 วันเป็นเวลา 27 วัน พบว่าซีรัมเสมือนจริงที่เตรียมขึ้นในวันแรก มีลักษณะทางกายภาพคือ มีสีเหลือง ขุ่นเล็กน้อย (Figure 2) และเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาโดยมีลักษณะทางกายภาพเหมือนวันเริ่มต้นได้ 6 วัน จากนั้นตั้งแต่วันที่ 9 ถึง 27 ลักษณะทางกายภาพจะเริ่มเปลี่ยนเป็น สีเหลืองเข้ม ขุ่น และมีตะกอน โดยตะกอนจะพบมากในวันที่ 12 - 27 ของการเก็บรักษา (Table 1) ในขณะที่ เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีลักษณะทางกายภาพ สีเหลือง ขุ่นเล็กน้อยตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนครบเวลา 27 วัน



Figure 2 The negative (A) and positive (B) virtual serum for antibody screening at day 0

ผลการทดสอบ antibody screening ของซีรัมเสมือนจริง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 27 วัน พบว่าซีรัมเสมือนจริงที่ไม่เติม anti-D (IgG) และทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT และวิธี CAT ให้ผลการทดสอบเหมือนกัน โดยให้ผลลบทั้ง 3 ครั้ง (triplicate) ที่สถานะ RT, 37 °C และ IAT (ไม่แสดงผลการทดลอง) สำหรับซีรัมเสมือนจริงที่เติม anti-D (IgG) และทำการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT ให้ผลการทดสอบบวกที่สถานะ IAT (Figure 3 และ Table 2) และด้วยวิธี CAT ให้ผลการทดสอบบวก (Figure 4 และ Table 3) ตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนครบเวลา 27 วัน

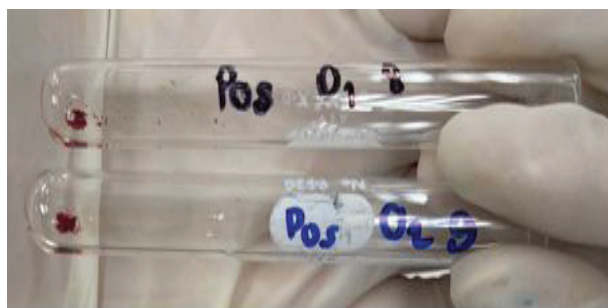


Figure 3 The positive results of antibody screening at IAT phase by conventional tube test

Table 1 Physical examination of virtual serum after storage at 2 - 8 °C and -20 °C for 27 days

Day (s)	Physical examination			
	2 - 8 °C		-20 °C	
	Negative (without anti-D (IgG))	Positive (with anti-D (IgG))	Negative (without anti-D (IgG))	Positive (with anti-D (IgG))
Day 0	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 3	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 6	dark yellow, turbid, bacteria few	dark yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 9	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 12	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 15	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 18	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 21	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 24	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few
Day 27	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	dark yellow, turbid with sediment, bacteria few, pseudohyphae few	yellow, turbid, bacteria few	yellow, turbid, bacteria few

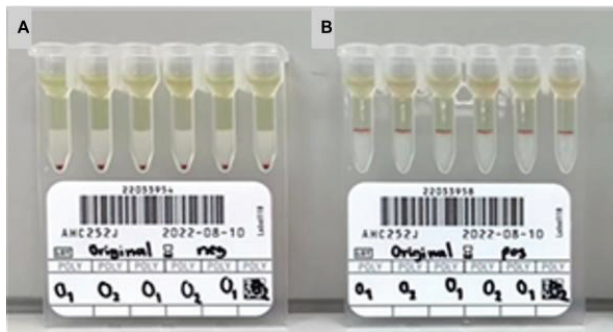
Table 2 Results of antibody screening by CTT using positive virtual serum stored at 2 - 8 °C and -20 °C

Day (s)	Positive virtual serum stored at 2 - 8 °C								Positive virtual serum stored at -20 °C							
	O1				O2				O1				O2			
	RT	37 °C	IAT	CCC	RT	37 °C	IAT	CCC	RT	37 °C	IAT	CCC	RT	37 °C	IAT	CCC
Day 0	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 3	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 6	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 9	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 12	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 15	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 18	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 21	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 24	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND
Day 27	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND	0	0	3+	ND

ND = Not done

Table 3 Results of antibody screening by CAT using positive virtual serum stored at 2 - 8 °C and -20 °C

Day (s)	Positive virtual serum stored at 2 - 8 °C						Positive virtual serum stored at -20 °C					
	O1			O2			O1			O2		
	37 °C			37 °C			37 °C			37 °C		
	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd
Day 0	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 3	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 6	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 9	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 12	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 15	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 18	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 21	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 24	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+
Day 27	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+	4+

**Figure 4** The negative results (A) and positive results (B) of antibody screening by column agglutination test

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

มีการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมซีรัมเสมือนจริงเพื่อใช้ในการเรียนการสอนภาคปฏิบัติการ วิชา วิทยาศาสตร์การบริการ 1 ของคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต เรื่อง antibody screening (อังสนา โยธินารักษ์ และอรนนท์ พรหมมาโน, 2560) และได้มีการพัฒนาการเตรียมซีรัมเสมือนจริงเพื่อให้ผลการทดสอบ antibody screening ไม่พบผลบวกปลอมจากการที่เม็ดเลือดแดงของ screening cells แตกจากสารละลายของซีรัมเสมือนจริง โดยการเติมอัลบูมินลงในการเตรียมซีรัมเสมือนจริง (อังสนา โยธินารักษ์, 2561) ซึ่งต่อมาได้มีการลดปริมาณของอัลบูมิน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย (ณภาพัช แสงทวีป และคณะ, 2564) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาการเก็บซีรัมเสมือนจริง เพื่อไว้ใช้ในการเรียนการสอนดังกล่าว การศึกษานี้จึงเก็บซีรัมเสมือนจริงที่

เตรียมขึ้นจากการพัฒนาที่ผ่านมา และเก็บที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส และ -20 องศาเซลเซียส การศึกษานี้ มีการเตรียมซีรัมเสมือนจริง จำนวน 600 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นการเตรียมครั้งเดียว จากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่เป็น 2 ส่วนๆ ละเท่ากัน ดังนี้ 1) ส่วนที่ 1 จำนวน 300 มิลลิลิตร ถ้าเป็นแบบให้ผลการทดสอบ antibody screening เป็นลบ จะไม่มีการเติม anti-D (IgG) จากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่เป็น 2 ส่วนๆ ละ 150 มิลลิลิตร ถ้าเป็นการเก็บแช่เย็นที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส จะเก็บทั้งขวดรูปชมพู่ ส่วนการเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จะแบ่งใส่หลอดทดลองๆ ละ 12 มิลลิลิตร ได้จำนวน 12 หลอด เพื่อนำมาละลายและตรวจสอบทุกๆ 3 วัน จนครบวันที่ 27 2) ส่วนที่ 2 จำนวน 300 มิลลิลิตร ถ้าเป็นแบบให้ผลการทดสอบ antibody screening เป็นบวก จะมีการเติม anti-D (IgG) ในอัตราส่วนการเจือจาง 1:8 เพื่อให้ได้ผลการทดสอบ antibody screening 3+ - 4+ จากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่เป็น 2 ส่วนๆ ละ 150 มิลลิลิตร ถ้าเป็นการเก็บแช่เย็นที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส จะเก็บทั้งขวดรูปชมพู่ ส่วนการเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จะแบ่งใส่หลอดทดลองๆ ละ 12 มิลลิลิตร ได้จำนวน 12 หลอด เพื่อนำมาละลายและตรวจสอบทุกๆ 3 วัน จนครบวันที่ 27 การศึกษานี้ จึงมีขวดรูปชมพู่ทั้งหมด จำนวน 4 ขวด ซึ่งผู้วิจัยได้ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของทั้ง 4 ขวด ด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะควรได้เหมือนกัน หรือใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามผลจาก Table 1 ในวันที่ 0 ถึงวันที่ 27 พบว่าซีรัมเสมือนจริงที่เตรียมขึ้นทั้งแบบที่ให้ผล antibody screening เป็นลบ

และบวก (เดิม anti-D (IgG) พบแบคทีเรียจำนวนเล็กน้อย (1-10/HPF) อาจเป็นเพราะอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมซีรัมเหมือนจริง มีการปนเปื้อนของแบคทีเรีย ซึ่งอาจมีผลกับการเก็บรักษาซีรัมเหมือนจริงที่ 2-8 ° ซึ่งแบคทีเรียและเชื้อราอาจเพิ่มจำนวนและเจริญเติบโตได้ ดังนั้นหากต้องการเก็บรักษาซีรัมเหมือนจริงให้นานขึ้น ควรมีการนิ่งฆ่าเชื้ออุปกรณ์ก่อนใช้งาน อย่างไรก็ตามแบคทีเรียและเชื้อราที่พบไม่มีผลต่อการทดสอบ antibody screening เมื่อทดสอบด้วยวิธี CTT และ CAT ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 27 วัน

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเก็บซีรัมเหมือนจริง ที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส ลักษณะทางกายภาพของซีรัมเหมือนจริงในวันที่ 6 เริ่มมีสีเหลืองเข้มขึ้น และสีเหลืองเข้มนี้อยู่ตลอดไปจนถึงวันที่ 27 ส่วนตะกอนเริ่มมีขึ้นในวันที่ 9 และมีตะกอนมากขึ้นตั้งแต่วันที่ 12 จนถึงวันที่ 27 ที่เก็บซีรัมเหมือนจริงทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมซีรัมเหมือนจริงมีการจับกันจนเกิดเป็นตะกอนในที่ยื่น ในขณะที่การเก็บซีรัมเหมือนจริง ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงวันที่ 27 แสดงว่าการเก็บแช่แข็ง ช่วยทำให้สารต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมซีรัมเหมือนจริงมีความคงตัว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารที่ใช้ในการเตรียมซีรัมเหมือนจริง

อย่างไรก็ตามการทดสอบ antibody screening ด้วยวิธี CTT และ CAT ให้ผลการทดสอบเป็นลบและบวกจริง ตลอดระยะเวลาที่ศึกษานาน 27 วัน โดยไม่เกิดผลบวกปลอมและผลลบปลอม แสดงว่าการเก็บซีรัมเหมือนจริงที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากกว่าการเก็บซีรัมเหมือนจริงที่อุณหภูมิ 2 - 8 องศาเซลเซียส

สรุป การเก็บซีรัมเหมือนจริง ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ทำให้มีลักษณะทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงจากวันเริ่มต้น และสามารถเก็บได้นาน 27 วัน โดยไม่เกิดผลบวกปลอมและผลลบปลอมในการทดสอบ antibody screening

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเพิ่มเติม ควรทำการศึกษาความแรงของปฏิกิริยาการจับกลุ่มของเม็ดเลือดแดง ในระดับ 1+ - 2+ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่ชัดเจนกว่า หากคุณสมบัติของซีรัมเหมือนจริงในการตรวจ antibody screening มีการเปลี่ยนแปลง ไป ซึ่งจะชัดเจนกว่าการศึกษาโดยใช้ความแรงของปฏิกิริยาระดับ 3+ - 4+ เพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Ortho Clinical Diagnostics (THAILAND) ที่ ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือและอุปกรณ์ สำหรับการทดสอบโดยวิธี column agglutination technique (CAT)

เอกสารอ้างอิง

- ณภาพัช แสงทวีป, นุรอาฟีพะร์ แซแมง, ปรีญาภัทร เม่งบุตร, วัชรินทร์ จันผือโป้ด, สุกฤตา พลอยมีค่า และอนิศรา อินทะชิน. (2564). การตรวจสอบซีรัมเหมือนจริงสำหรับการตรวจกรอง *Unexpected Antibody* ที่ให้ผลการทดสอบเป็นลบและบวกโดย *Conventional Tube Test* และ *Column Agglutination Technique*. (ภาคนิพนธ์ปริญญาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.
- ฝ่ายผลิตน้ำยาแอนติซีรัมและผลิตภัณฑ์เซลล์ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย. (2567). 3 % screening cells. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย.
- ภาวิณี คุปตวินทุ, มรกต เอมทิพย์ และ ดวงพร สังข์นุ่น. (2553). แอนติบอดีของหมู่เลือดชนิดต่างๆ ใน ผู้ป่วยที่ส่งตรวจ ณ ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติข. วารสารโลหิตวิทยาและเวชศาสตร์บริการ โลหิต, 20(4), 255-262.
- ภัทรพร อิศรางกูร ณ อยุธยา. (2548). อิศรางกูร ณ อยุธยา, ภ. (2548). ภาวะแทรกซ้อนจากการรับเลือด เชื้อดื้ออักเสบ บีซี และเชื้อเอชวี (HBV, HCV, HIV). สืบค้นจาก http://www.thalassemia.or.th/disease_trans.html
- อัสสนา โยธินารักษ์ และอรนนท์ พรหมมาโน. (2560). การศึกษาเบื้องต้นเพื่อเตรียมซีรัมเหมือนจริงสำหรับการตรวจกรอง *unexpected antibody* [เอกสารประกอบการประชุม]. การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 5, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.
- อัสสนา โยธินารักษ์. (2561). การเตรียมซีรัมเหมือนจริงสำหรับการตรวจกรอง *unexpected antibody* [Preparation of simulated serum for unexpected antibody screening] [เอกสารนำเสนอ]. การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 6, สมุทรปราการ, ประเทศไทย.
- Raos, M., Novoselac, J., Burnac, I.L., Lukic, M., Leskovic, I., & Cepulic, B.G. (2018). Evaluation of antibody screening and identification pre-transfusion tests using DG
- Roback, J.D., Combs, M.R., Grossman, B.J., Hillyer, C.D. (2008). Technical Manual 16th ed. Bethesda, American Association of Blood Banks.
- Tholpady, A. & Bai, Y. (2016). Antibody screening. Retrieved from <http://emedicine.medscape.com/article/1731232-overview>.

การปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิด Top-Lit Up-Draft (TLUD) แบบระบบบังคับลมและแบบธรรมชาติ

Improving thermal performance of Top-Lit Up-Draft (TLUD) biomass stoves with forced and natural draft systems

นุชลี ทิพย์มณฑา¹, พลชัย ขาวนวล^{2*} และ สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์³

Nuchalee Thipmonta¹, Palachai Khaonuan^{2*} and Somboon Prasongchan³

Received: 21 June 2024 ; Revised: 9 August 2024 ; Accepted: 10 September 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนเตาชีวมวลชนิด TLUD 3 รูปแบบ ได้แก่ เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ (force draft and choke ring TLUD biomass stove) เตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว (force draft TLUD biomass stove) และเตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว (choke ring TLUD biomass stove) จากการทดสอบทิศทางลมที่ออกจากระบบบังคับลมไปสู่เตา แตกต่างกัน 3 มุม คือ 0° 45° และ 90° กับแนวระดับ พบว่าทิศทางของลมที่ มุม 45° ใช้เวลาในการต้มน้ำเดือดต่ำสุด และจากการทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลด้วยวิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (water boiling test; WBT) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิด TLUD ทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่าเตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว และเตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว แต่เตาที่ใช้ระบบแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ (SCC) อัตราการเผาไหม้ (BR) กำลังไฟ (P) เวลาในการเดือดของน้ำ (BT) และปริมาณเชื้อเพลิง เท่ากับ 18.84 ± 0.14 % 15.47 ± 0.21 MJ/kg 0.800 ± 0.011 Baht/kg 38.27 ± 0.51 g/min 9.87 ± 0.13 kW 10.58 ± 0.49 min และ 2.279 ± 0.049 kg ตามลำดับ และยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องการประหยัดเชื้อเพลิง ประหยัดพลังงานไฟฟ้า ลดต้นทุนอุปกรณ์บังคับลม และมีความสะดวกกว่าเตาอีก 2 รูปแบบ เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบบังคับลม โดยเตาที่พัฒนาขึ้นมานี้มีกำลังไฟที่สูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้พลังงานความร้อนที่สูง และใช้เวลานานและต่อเนื่อง เช่น งานอุตสาหกรรมครัวเรือนในการทำขนม การนึ่งขนม การนึ่งข้าว การผลิตไอน้ำ เป็นต้น

คำสำคัญ: เตาชีวมวลชนิด TLUD, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, ระบบบังคับลม, ระบบธรรมชาติ, แผ่นควบคุมเปลวไฟ

Abstract

This research aims to design and improve the thermal performance of three types of TLUD (Top-Lit Up-Draft) biomass stoves: TLUD biomass stoves using a force draft system combined with a choke ring system, TLUD stoves using only a force draft system, and TLUD stoves using only a choke ring system. The study tested different wind directions from the forced draft system into the stove at three angles: 0°, 45°, and 90° relative to the horizontal plane. It was

¹ อาจารย์ประจำหลักสูตรรายวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-mail: nuchalee.t@rmutsv.ac.th

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, หลักสูตรรายวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-mail: palachai.k@rmutsv.ac.th

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, หลักสูตรรายวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-mail: somboom.p@rmutsv.ac.th

¹ Lecturer, Program of Science, Department of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District, Songkhla, 90000, Thailand E-mail: nuchalee.t@rmutsv.ac.th

² Assistant Professor, Program of Science, Department of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District, Songkhla, 90000, Thailand E-mail: palachai.k@rmutsv.ac.th

³ Assistant Professor, Program of Science, Department of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District, Songkhla, 90000, Thailand E-mail: somboom.p@rmutsv.ac.th

* Corresponding author: E-mail: palachai.k@rmutsv.ac.th

found that a 45° angle used the least amount of time to bring water to boil. The thermal performance of the TLUD biomass stoves was assessed using the Water Boiling Test (WBT) to compare the three types of TLUD stoves. The findings revealed that TLUD stoves employing both the force draft and choke ring systems had the highest thermal efficiency, outperforming those using only the choke ring system or only the force draft system. However, the TLUD stoves using only the choke ring system had higher thermal efficiency than those using only the force draft system. The efficiency metrics were as follows: thermal efficiency (η) was $18.84 \pm 0.14\%$, specific energy consumption (SEC) was 15.47 ± 0.21 MJ/kg, specific cost consumption (SCC) was 0.800 ± 0.011 Baht/kg, burning rate (BR) was 38.27 ± 0.51 g/min, firepower (P) was 9.87 ± 0.13 kW, boiling time (BT) was 10.58 ± 0.49 minutes, and fuel consumption was 2.279 ± 0.049 kg. The developed stove offers advantages in fuel savings, reduced electricity consumption, lower costs for air control equipment, and convenience as it does not require electrical power for the draft system. This makes it suitable for applications requiring high and sustained thermal energy, such as household industrial activities in baking, steaming food, and steam production.

Keywords: TLUD biomass Stoves, thermal efficiency, force draft system, natural draft system, choke ring system

บทนำ

ประเทศไทยกำลังประสบปัญหาวิกฤตทางด้านพลังงาน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ใช้แล้วหมดสิ้นไป และพลังงานหลักกำลังจะหมดไปในอีกไม่ช้า และการใช้พลังงานอาจก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนจึงมีการคิดริเริ่มในการสรรหาพลังงานจากแหล่งพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานทดแทน และพลังงานชีวมวล เป็นต้น สถานการณ์พลังงานทดแทนในประเทศไทยนั้นมีการพัฒนาที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปี 2557 พบว่ามีการใช้พลังงานเป็นพลังงานทดแทน 5,144 ktoe (พินตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ) ซึ่งเป็นร้อยละ 89 ของพลังงานทดแทนทั้งหมดที่มีการใช้งาน (9,025 ktoe) โดยเป้าหมายปี 2579 การผลิตพลังงานทดแทนประเภทชีวมวล 22,100 ktoe โดยมีการขับเคลื่อนการขับเคลื่อนการพัฒนาพลังงานทดแทนตามยุทธศาสตร์ชาติ (แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579)

ปัจจุบันพลังงานทดแทนมีความนิยมสูงขึ้น โดยเฉพาะการใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวล ซึ่งใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทชีวมวล เช่น เศษไม้ ถ่าน หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นเชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการหุงต้ม ประกอบอาหาร และการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มรายได้ โดยมีแนวโน้มที่แก๊สหุงต้มมีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ (ราคาปัจจุบัน 450 บาทต่อถังขนาด 15 กิโลกรัม) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการส่งเสริมลงไปใช้ในชุมชนต่อไป

ไม้ยางพาราซึ่งเป็นชีวมวลประเภทหนึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกจำนวนมาก โดยปี 2565 มีปริมาณการเพาะปลูกทั้งสิ้น 24,229,386 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2567) โดยส่วนต่างๆ ของไม้ยางพาราจะถูกนำไปใช้ประโยชน์เกือบทั้งหมด เช่น ชีวเถ้า เศษไม้ ปลาย และปึกไม้ยางพารา ยกเว้น

กิ่งก้านไม้ยางพาราที่นั้นที่ยังไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

เตาชีวมวลเป็นเตาที่ใช้พลังงานจากการเผาไหม้ชีวมวล กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งเป็นเชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลในสภาวะการเผาไหม้แบบปราศจากอากาศ โดยขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวมวล ประกอบด้วย 1) การเผาไหม้ 2) ริดักชั่น 3) ไพโรไลซิส และ 4) การอบแห้ง โดยกระบวนการเผาไหม้จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนเกิดการรีดิวซ์เป็นแก๊สชีวมวล เช่น แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เตาชีวมวลยังมีการใช้งานอยู่ทั่วไป ซึ่งประชากรจำนวน 2.8 พันล้านคน (มากกว่า 1 ใน 3 ของประชากรโลก) ยังมีการใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลอยู่ โดยถูกใช้ประโยชน์ในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม โดยเตาชีวมวลมีหลายรูปแบบ ได้แก่ เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม และเตาที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพแล้วเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิง ลดต้นทุนประหยัดเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง (Yunusa *et al.*, 2023) จากงานวิจัยของธเนศ ไชยชนะ และคณะ (2556) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มระดับครัวเรือนจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ เตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง เตาดำขนาดกลาง เตาอั้งโล่ธรรมดา เตาปากยื่น เตาดำขนาดเล็ก และเตาอั้งโล่ธรรมดาขนาดเล็ก ซึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 30.54 24.29 21.70 19.80 18.46 และ 16.66% ตามลำดับ ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาชีวมวลที่แตกต่างกัน โดย Hailu (2022) พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ และขี้เลื่อย-ขี้วัวอัดก้อน ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ประเภทนี้ถูกใช้กับ

เตาแบบเดียวกันพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่างกันโดยมีค่าเท่ากับ 32.03 ± 0.3 31.5 ± 0.5 และ $26.25 \pm 0.25\%$ ตามลำดับ ซึ่งการใช้ระบบบังคับลมมาช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะมีผลต่อสมรรถนะของเตา โดย Bofo-Mensah *et al.* (2021) เปรียบเทียบระหว่างเตาชีวมวลที่มีระบบบังคับลม (force draft) และแบบธรรมชาติ (natural draft) พบว่าเตาชีวมวลที่มีระบบบังคับลมมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพน้อยกว่า ในขณะที่เตาชีวมวลแบบธรรมชาติมีต้นทุนที่ต่ำกว่าและบำรุงรักษาได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ MacCarty *et al.* (2024) ยังพบว่าการใช้ระบบบังคับลมร่วมกับเตาชีวมวลจะทำให้ลดเวลาการทำงานและลดปริมาณ PM 2.5 เมื่อเทียบกับเตาชีวมวลที่ไม่ใช้ระบบลมอยู่ที่ 29 และ 64% ตามลำดับ อีกทั้ง Bentson *et al.* (2024) พบว่าการใช้ระบบบังคับลมร่วมกับเตาชีวมวลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นจากเดิม 34% การปล่อย PM 2.5 ลดลง 89% และปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง 74% เมื่อเทียบกับเตาชีวมวลที่ไม่ใช้ระบบบังคับลม จากงานวิจัยเตาชีวมวลมีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เช่น เตาอังโล่เป็นเตาที่มีความนิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างสูง สามารถเติมเชื้อเพลิงต่อเนื่อง แต่เกิดควันมากและกำลังไฟต่ำ ส่วนเตาจรวดมีกำลังไฟที่สูง สามารถใช้เชื้อเพลิงขนาดยาวได้ มีควันน้อย ควบคุมกำลังไฟได้ง่าย แต่การให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอ และเตาชีวมวล TLUD (top-lit up-draft) เป็นเตาชีวมวลที่ออกแบบมาให้มีโครงสร้างเป็นเตาผนัง 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นห้องเผาไหม้ และชั้นที่ 2 เป็นช่องอุณหอากาศที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางให้อากาศจากภายนอกไหลผ่านเข้ามาบริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ยังมีช่องทางสำหรับการอากาศไหลออกอยู่ด้านบนของห้องเผาไหม้ของเตา ในขณะที่เตาเผาไหม้ชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ แก๊สชีวมวลที่เกิดจะลอยขึ้นไปด้านบนและเกิดการลุกไหม้บริเวณด้านบนของเตา อากาศร้อนที่ไหลเวียนอยู่ในช่องอุณหอากาศจะถูกบังคับให้ไหลจากด้านล่างของเตาสู่ด้านบนของห้องเผาไหม้เพื่อช่วยในกระบวนการเผาไหม้แบบทุติยภูมิที่บริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้ (สุปราณี วุณศรี และคณะ, 2566) โดยเตาดังกล่าวมีควันน้อย มีกำลังไฟสูง แต่การป้อนเชื้อเพลิงค่อนข้างยาก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนเตาชีวมวลชนิด TLUD โดยทดสอบด้านทิศทางของลมที่แตกต่างกัน และเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิด TLUD ระหว่าง เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว และเตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและปรับปรุงสมรรถนะเชิงความร้อนเตาชีวมวลชนิด TLUD โดยทดสอบด้านทิศทางของลมที่แตกต่างกัน
2. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิด TLUD ระหว่าง (1) เตาที่ใช้ระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ (2) เตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว และ (3) เตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว

การทดลอง

1. การออกแบบเตาชีวมวลต้นแบบชนิด TLUD

ประกอบเตาชีวมวลชนิด TLUD ทำจากโลหะโดยมีส่วนประกอบในหน่วยเซนติเมตร ดังนี้ 1) เสื้อเตา มีขนาดกว้าง 30 ยาว 30 สูง 50 2) ห้องเผาไหม้ มีขนาดกว้าง 19 ยาว 19 สูง 30 3) กระบะรองขี้เถ้า มีขนาดกว้าง 25 ยาว 27.5 สูง 6.5 4) ระบบบังคับลม (force draft) เป็นกล่องปริซึมสี่เหลี่ยมคางหมูขนาดกว้าง 16.5 ยาว 24 สูง 5 5) แผ่นควบคุมเปลวไฟ (choke ring) มีขนาดกว้าง 23 ยาว 23 เจาะตรงกลางโดยเว้นระยะขอบเข้าไปข้างใน 2 ต่อแผ่นเหล็กเอียงกว้าง 5 เป็นมุมก้มกับแนวระดับ 6) ที่จับเตาสำหรับเคลื่อนย้าย

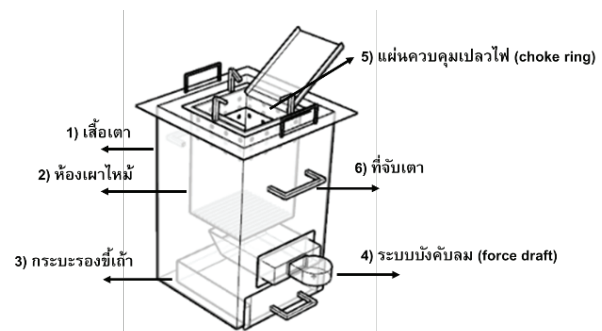


Figure 1 Prototype of TLUD biomass stove

2. การเปรียบเทียบทิศทางลมที่มีผลต่อการเดือดของน้ำ

การทดสอบทิศทางลมจากระบบบังคับลมของเตาชีวมวลชนิด TLUD โดยการเปรียบเทียบทิศทางลมและองศาของระบบลมที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0° , 45° และ 90° กับแนวระดับ โดยพัดลมที่ใช้ทดสอบขนาด 12 โวลต์ โดยมีความเร็วลม เท่ากับ 10.2 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 2 โดยการทดสอบการต้มน้ำและจับเวลาที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเข้าสู่จุดเดือด

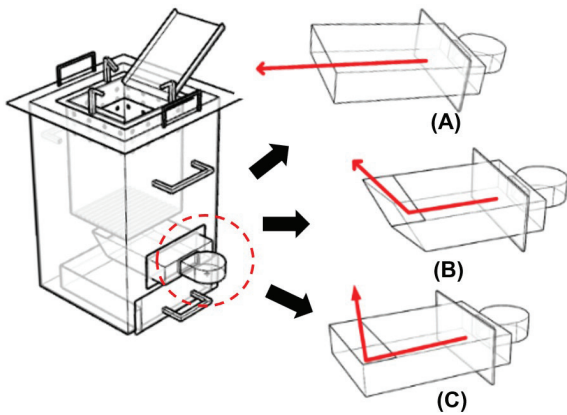


Figure 2 Testing of wind direction for the force draft system of the TLUD biomass stove (A) wind direction at 0° (B) wind direction at 45° (C) wind direction at 90°

3. การเปรียบเทียบเตาชีวมวลชนิด TLUD

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิด TLUD ที่มีลักษณะแตกต่างทั้ง 3 รูปแบบ ดัง Figure 3 ประกอบด้วย

แบบที่ 1 (A) เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ (force draft and choke ring)

แบบที่ 2 (B) เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลม เพียงอย่างเดียว (force draft) และ

แบบที่ 3 (C) เตา TLUD ที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว (choke ring) ซึ่งไม่ใช้ระบบบังคับลม (natural draft)

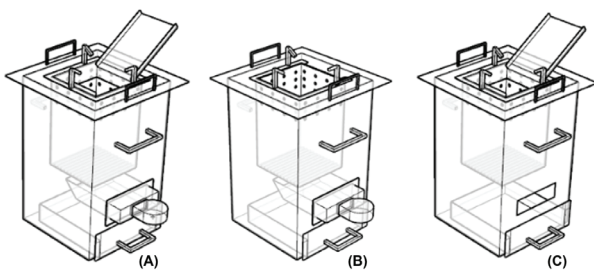


Figure 3 TLUD biomass stove

(A) force draft and choke ring TLUD biomass stove
(B) force draft TLUD biomass stove (C) choke ring TLUD biomass stove

4. ทดสอบค่าสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด TLUD

ทำการทดสอบสมรรถนะเตาจรวด ใช้วิธีทดสอบการเดือดของน้ำ (water boiling test; WBT) โดยใช้ น้ำปริมาตร 5 ลิตร เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบคือกิ่งไม้ยางพารา ซึ่งมีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value; LHV) เท่ากับ

15,472 กิโลจูล/กิโลกรัม (kJ/kg) ราคาเชื้อเพลิง 0.8 บาท/กิโลกรัม ความยาว 15 เซนติเมตร ทำการไล่ความชื้นในเนื้อไม้โดยอบที่อุณหภูมิ 108-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ยังมีความชื้นอยู่จะส่งผลทำให้ค่าสมรรถนะของเตาชีวมวลที่ต้องการทดสอบเกิดความแปรปรวน (Huangfu *et al.*, 2014) เก็บรักษาเชื้อเพลิงที่อบไล่ความชื้นแล้วไว้ในภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้นในอากาศกลับเข้าสู่เชื้อเพลิง เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิคือเทอร์โมมิเตอร์ Fluke 54-2B และโพรบชนิด k Fluke 80pk-22 ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -40 – 1,090 องศาเซลเซียส ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในภาชนะอลูมิเนียม โดยที่ปลายโพรบอยู่ตำแหน่งภายในกึ่งกลางภาชนะและสูงจากก้นภาชนะ 3 เซนติเมตร ภาชนะที่ใช้ในการทดสอบคือ ภาชนะที่ใช้ต้มน้ำเป็นหม้ออะลูมิเนียม (AL 1100 ค่าการนำความร้อน 222 W/m.K) หนา 1.3 มม. ความจุ 8 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณปากหม้อ 28 ซม. สูงไม่รวมฝา 15.8 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางก้นหม้อ 22 ซม. วัดอัตราการไหลของลมที่บริเวณปากช่องระบบบังคับลมโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด Fluke 925 เพื่อนำไปคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้

ในการทดสอบการเดือดของน้ำดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีตู้ดูดควันเพื่อป้องกันผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเริ่มต้นจากการใส่น้ำลงในภาชนะปริมาณ 5 ลิตร จากนั้นใส่เชื้อเพลิงลงในห้องเผาไหม้ปริมาณ 1.3 กิโลกรัม จุดเชื้อเพลิงจากด้านบนพร้อมเริ่มจับเวลา ที่ระยะเวลาไว้ 2 นาที เพื่อให้เชื้อเพลิงติดดี จากนั้นนำภาชนะที่บรรจุน้ำมาวางบนเตา ใส่ระบบบังคับลมและเริ่มวัดอุณหภูมิของน้ำ เมื่ออุณหภูมิของน้ำถึงจุดเดือดให้หยุดการทำงานของระบบบังคับลม และทำการคงสภาพการเดือดของน้ำต่อไปอีก 45 นาที ควบคุมอุณหภูมิของน้ำไม่ให้ต่ำกว่าจุดเดือดเกิน 6 องศาเซลเซียส โดยการค่อยๆ เติมเชื้อเพลิงเพิ่มครั้งละ 0.5 กิโลกรัม เมื่อครบเวลา 45 นาที ให้ยกภาชนะบรรจุน้ำออก นำเชื้อเพลิงออกจากเตาใส่ในภาชนะปิดเพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้ต่อ ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือและขี้เถ้าเพื่อใช้ในการคำนวณมวลเชื้อเพลิงสุทธิ เมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องจึงทำการชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลือเพื่อคำนวณมวลของไอน้ำที่เกิดขึ้น (m_v) จากน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณปริมาณต่างๆ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency; η) (Berrueta *et al.*, 2008) คือ ร้อยละของการนำความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเตาชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยคำนวณได้จาก

$$\eta = \left[\frac{4.186 m_w (T_f - T_i) + 2260 m_v}{\dot{m}_f \times \text{LHV}} \right] \times 100 \quad (1)$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน มีหน่วยเป็น ร้อยละ (%) m_w คือ มวลของน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) T_i คือ อุณหภูมิต่ำสุดของน้ำ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) T_f คือ อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) m_v คือ มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) f_d คือ มวลของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น กิโลจูล/กิโลกรัม (kJ/kg) 4.186 คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลจูล/กิโลกรัม.องศาเซลเซียส (kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$) 2260 คือ ความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลจูล/กิโลกรัม (kJ/kg)

2. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption; SEC) (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2556) คือ พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ในเตาที่ใช้สำหรับผลิตไอน้ำ 1 กิโลกรัม

$$SEC = \frac{E_v}{m_v} \quad (2)$$

โดย SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีหน่วยเป็น เมกะจูล/กิโลกรัม (MJ/kg) E_v คือ พลังงานความร้อนจากชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการระเหยน้ำโดยคำนวณจากผลคูณระหว่างค่าความร้อนทางต่ำกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ มีหน่วยเป็น เมกะจูล (MJ) m_v คือ มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

3. ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ (specific cost consumption; SCC) (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2556) คือ ค่าใช้จ่ายของความร้อนจากชีวมวลที่ถูกเผาไหม้เพื่อนำมาทำให้น้ำ 1 กิโลกรัม กลายเป็นไอน้ำ

$$SCC = \frac{C}{m_v} \quad (3)$$

โดย SCC คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ มีหน่วยเป็น Baht/kg C คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน มีหน่วยเป็น Baht m_v คือ มวลของไอน้ำที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

4. อัตราการเผาไหม้ (burning rate; BR) (Oyelaran *et al.*, 2015) คือ อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาในหนึ่งหน่วยเวลา คำนวณโดย

$$R_b = \frac{f_d}{\Delta t_m} \quad (4)$$

โดย R_b คือ อัตราการเผาไหม้ มีหน่วยเป็น กรัม/นาที (g/min) f_d คือ มวลเชื้อเพลิงสุทธิ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) Δt_m คือ ช่วงเวลาของการเผาไหม้ในหน่วยนาที มีหน่วยเป็น นาที (min)

5. กำลังไฟ (firepower; P) (Huangfu *et al.*, 2014) เป็นอัตราการใช้พลังงานชีวมวลที่ถูกเผาไหม้ในเตาในหนึ่งหน่วยเวลา คำนวณโดย

$$P = \frac{E}{\Delta t_s} \quad (5)$$

โดย P คือ กำลังไฟของเตาชีวมวล มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ (kW) E คือ พลังงานที่ใช้ มีหน่วยเป็น กิโลจูล (kJ) Δt_s คือ ช่วงเวลาของการเผาไหม้ในหน่วยวินาที มีหน่วยเป็น วินาที (s)

6. เวลาในการเดือดของน้ำ (boiling time; BT) เป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำปริมาตร 5 ลิตร เดือดโดยใช้เตาชีวมวลซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่วางภาชนะบรรจุบนเตาจนกระทั่งน้ำเดือด มีหน่วยเป็น นาที (min)

7. ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (fuel quantity) เป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาทั้ง 3 รูปแบบ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ประกอบด้วย 2 กลุ่มการทดลอง คือ กลุ่มที่ 1 เป็นการหาค่ามุมของทิศทางลมที่ปล่อยเข้าสู่เตา มีจำนวน 3 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางลมที่ 0° , 45° และ 90° กับแนวระดับ เมื่อได้มุมทิศทางลมที่ดีที่สุดแล้วจึงเข้าสู่กลุ่มการทดลองที่ 2 โดยกลุ่มที่ 2 เป็นการทดสอบลักษณะเตา มีเตาจำนวน 3 รูปแบบ ได้แก่ เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ, เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว และ เตา TLUD ที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟ เพียงอย่างเดียว แต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าเฉลี่ย (mean $\pm$ S.D.) วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ของผลการทดลอง และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม R

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการออกแบบเตาชีวมวลชนิด TLUD

จากการออกแบบเตาชีวมวลต้นแบบชนิด TLUD และสามารถนำใช้งานกับภาชนะทุกประเภทในครัวเรือนจาก Figure 1 โดยมีส่วนประกอบ ดังนี้ 1) เสื้อเตา ทำหน้าที่พยุ

โครงสร้างเตา โดยเชื้อเตาอยู่ในตำแหน่งนอกสุดของเตาชีวมวลชนิด TLUD 2) ห้องเผาไหม้ ทำหน้าที่ควบคุมการเผาไหม้รองรับเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการเผาไหม้และแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ และทำให้การส่งผ่านความร้อนจากด้านล่างห้องเผาไหม้ไปยังบริเวณปากเตา 3) กระบะรองรับเชื้อ ทำหน้าที่รองรับเชื้อที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ 4) ระบบบังคับลม ทำหน้าที่ปล่อยลมและควบคุมทิศทางลมที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ 5) แผ่นควบคุมเปลวไฟ ทำหน้าที่รองรับภาชนะควบคุมเปลวไฟบริเวณปากเตาไม่ให้เกิดการกระจายรองรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้และควบคุมไม่ให้เชื้อเพลิงหลุดออกจากห้องเผาไหม้ในกรณีที่ป้อนเชื้อเพลิงผิด 6) ที่จับเตา ทำหน้าที่สำหรับการเคลื่อนย้าย

2. ผลการเปรียบเทียบทิศทางลมที่มีผลต่อการเดือดน้ำ

จากการทดสอบและเปรียบเทียบทิศทางลมที่มีผลต่อการเดือดน้ำจากระบบลมของเตาชีวมวลชนิด TLUD ซึ่งมีการกำหนดทิศทางลมแตกต่างกัน ที่ถูกปล่อยออกมาจากระบบอากาศปฐมภูมิ ได้แก่ 0°, 45° และ 90° กับแนวระดับ โดยพัดลมที่ใช้ทดสอบขนาด 12 โวลต์ และวัดอัตราการไหลของลมที่ตำแหน่งตะแกรงตรงกันภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งลมที่มาจากระบบบังคับลม 0° มีทิศทางขนานกับกันห้องเผาไหม้ ทำให้ลมไม่เข้าห้องเผาไหม้โดยตรง มีอัตราการไหลของลมเท่ากับ $0.47 \pm 0.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ระบบบังคับลม 45° มีทิศทางพุ่งเข้าสู่กันห้องเผาไหม้ในแนวเฉียง มีอัตราการไหลของลมเท่ากับ $1.08 \pm 0.15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่ง และระบบบังคับลม 90° มีทิศทางพุ่งเข้าสู่กันห้องเผาไหม้ มีอัตราการไหลของลมเท่ากับ $0.82 \pm 0.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ดัง Figure 4 โดยการทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำ จำนวน 5 ลิตร และจับเวลาที่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเข้าสู่จุดเดือด พบว่า

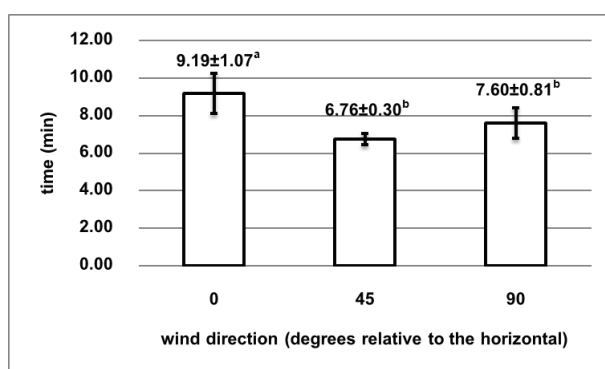


Figure 4 Comparative the effects of wind directions at 0°, 45°, and 90° angles on water boiling time

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

ผลการทดสอบทิศทางของลมที่ทำมุม 45° ใช้เวลาในการต้มน้ำเดือดน้อยที่สุด เท่ากับ 6.76 ± 0.30 นาที รองลงมาเป็นมุม 90° เท่ากับ 7.60 ± 0.81 นาที และที่มุม 0° ใช้เวลาในการต้มน้ำเดือดมากที่สุด เท่ากับ 9.19 ± 1.07 นาที ตามลำดับ (เวลาที่ในการต้มน้ำโดยใช้ลมในทิศทาง 45° และ 90° มีค่าไม่แตกต่าง แต่ทั้งคู่มิแตกต่างกับทิศทาง 0° อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05) ในการเปรียบเทียบทิศทางของลมที่เข้าสู่ระบบการเผาไหม้ของเตาที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า การทำมุม 45° ใช้เวลาน้อยกว่า เนื่องจากมุม 45° ทิศทางของลมสามารถพุ่งเข้าสู่กันห้องเผาไหม้ได้โดยตรง ส่วนมุม 0° ไม่สามารถเข้าสู่กันห้องเผาไหม้ได้โดยไปกระทบกับเชื้อเตา แต่จะไปช่วยในการเผาไหม้บริเวณช่องอากาศทุติยภูมิ และมุม 90° ลมที่เข้าสู่ระบบบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังการไหลของลมที่ตำแหน่งตะแกรงตรงกันภายในห้องเผาไหม้ พบว่าระบบบังคับลม 45° มีอัตราการไหลของลมสูงสุด ถัดลงมาได้แก่มุม 90° และ 0° ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดสอบดังกล่าวจะใช้ทิศทางของลมที่ทำมุม 45° กับแนวระดับ

3. ผลการทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด TLUD

ผลการทดสอบเตาชีวมวลชนิด TLUD ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1) เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ (force draft and choke ring) แบบที่ 2) เตา TLUD ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว (force draft) และแบบที่ 3) เตา TLUD ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว (choke ring) โดยแผ่นควบคุมเปลวไฟมีหน้าที่ควบคุมเปลวไฟ ส่วนระบบบังคับลม มีหน้าที่เร่งการเผาไหม้

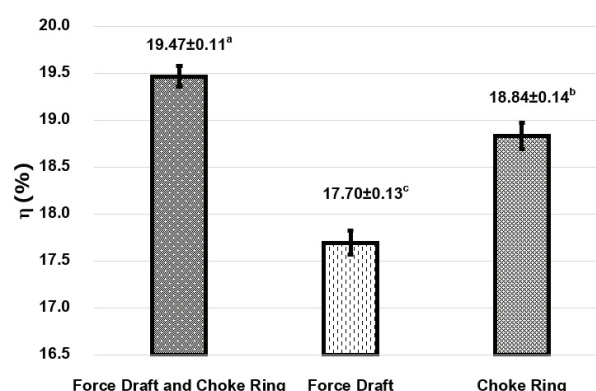


Figure 5 Comparative the thermal efficiency (η) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η) ของเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ มีค่าสูงสุด เท่ากับ $19.47 \pm 0.11\%$ รองลงมาเป็นแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว เท่ากับ $18.84 \pm 0.14\%$ และระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว มีค่าต่ำสุด เท่ากับ $17.70 \pm 0.13\%$ ซึ่งเตาทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าแตกต่างกันทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟได้มีการนำระบบบังคับลมเข้ามาช่วยเร่งในการเผาไหม้ ส่วนแผ่นควบคุมเปลวไฟช่วยในการป้องกันการกระจัดกระจายของเปลวไฟและทำให้เปลวไฟจากห้องเผาไหม้ถูกรวมกันและส่งเข้าไปยังก้นภาชนะ จึงทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟและเตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว

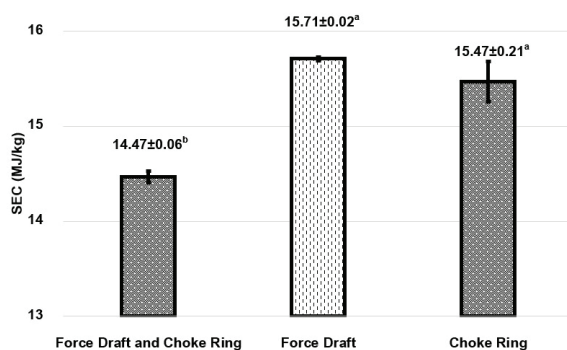


Figure 6 Comparative the specific energy consumption (SEC) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟมีค่าต่ำสุด (14.47 ± 0.06 MJ/kg) ซึ่งมีค่าแตกต่างกับเตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว (15.71 ± 0.02 MJ/kg) และเตาที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว (15.47 ± 0.21 MJ/kg) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยเตาทั้ง 2 ที่ได้กล่าวมานี้มีค่าไม่ต่างกันทางสถิติที่ระดับ 0.05

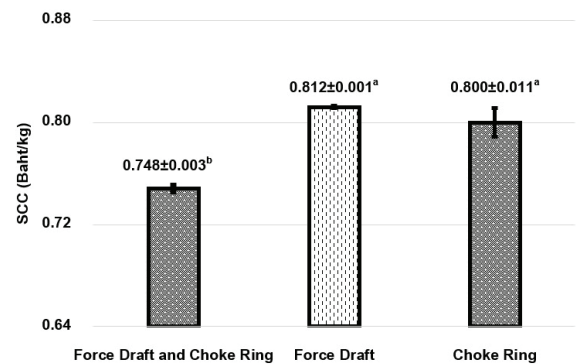


Figure 7 Comparative the specific cost consumption (SCC) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 7 ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะ (SCC) ของเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.748 ± 0.003 Baht/kg และมีค่าแตกต่างกับเตาทั้ง 2 แบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งเตาชีวมวลที่ใช้เพียงแผ่นควบคุมเปลวไฟและระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 0.800 ± 0.011 และ 0.812 ± 0.001 baht/kg ตามลำดับ และมีค่าไม่ต่างกันทางสถิติที่ระดับ 0.05

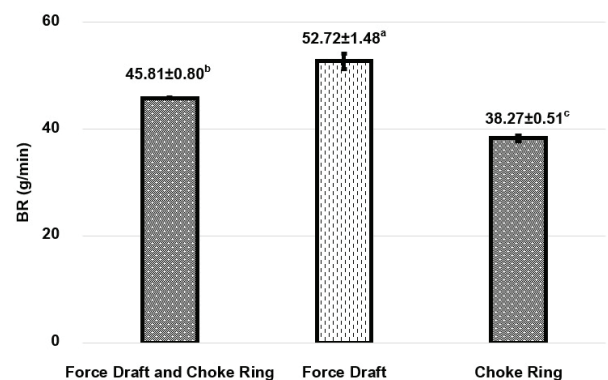


Figure 8 Comparative the burning rate (BR) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 8 ผลของอัตราการเผาไหม้ (BR) พบว่าเตาชีวมวลที่มีระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียวมีค่าสูงสุด เท่ากับ 52.72 ± 1.48 g/min รองลงมาเป็นเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบลมบังคับร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เท่ากับ 45.81 ± 0.80 g/min ส่วนแบบที่มีแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวที่ค่าต่ำสุด เท่ากับ 38.27 ± 0.51 g/min ตามลำดับ โดยที่เตาทั้ง 3 ต่างมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

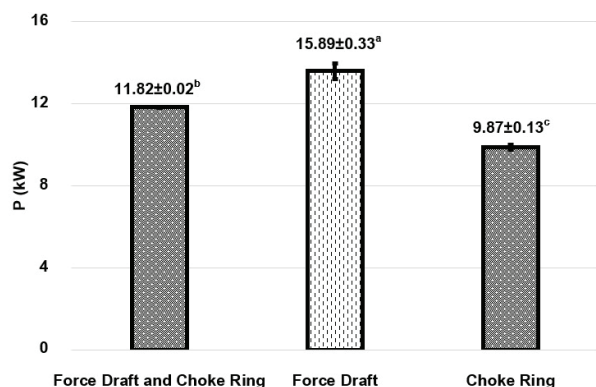


Figure 9 Comparative the firepower (P) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 9 กำลังไฟ (P) ของเตาชีวมวลแบบที่มีระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียวมีค่าสูงสุด เท่ากับ 13.59±0.38 kW รองลงมาเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เท่ากับ 11.82±0.02 kW ส่วนแบบที่มีแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 9.87±0.13 kW ตามลำดับ ซึ่งเตาชีวมวลทั้ง 3 รูปแบบมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ทั้งนี้เนื่องจากเตาชีวมวลที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียวจะมีการใช้ลมเข้ามาช่วยในการเผาไหม้และด้านบนของห้องเผาไหม้มีพื้นที่ในการรับอากาศมากกว่าเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ และแบบที่มีแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว

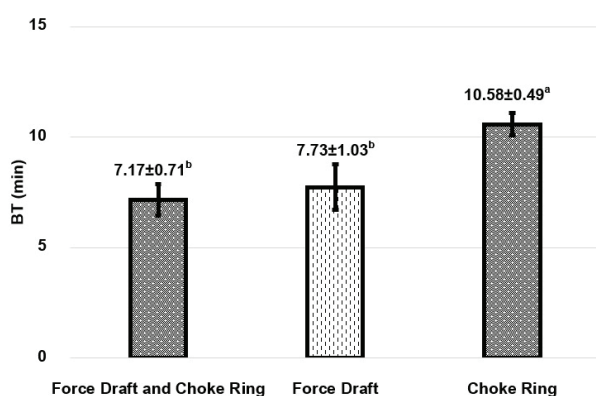


Figure 10 Comparative the boiling time (BT) of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 10 ผลของเวลาในการเดือดของน้ำ (BT) พบว่า เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ กับที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียวมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 7.17±0.71 และ 7.73±1.03 min ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่ต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในขณะที่เตาชีวมวลที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวมีค่าสูงสุด เท่ากับ 10.58±0.49 min เนื่องจาก เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ กับที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียวมีการใช้ลมเข้ามาช่วยในระบบการเผาไหม้ทำให้เวลาในการเดือดของน้ำมีค่าต่ำสุด โดยปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้น เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ ใช้ปริมาณอากาศ 0.46±0.05 m³ ส่วนเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว ใช้ปริมาณอากาศ 0.50±0.07 m³

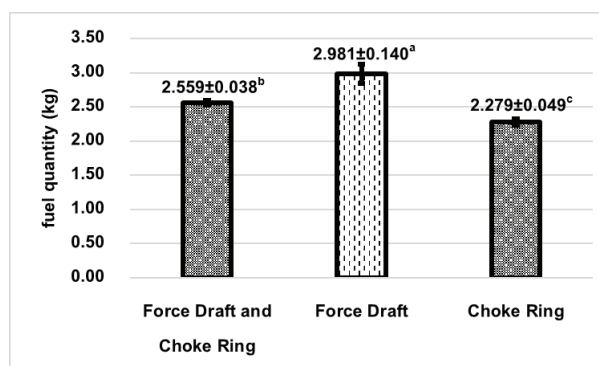


Figure 11 Comparative the fuel quantity of TLUD biomass stoves

Note: The mean value followed by the same letter is not different at the 0.05 significance level

จาก Figure 11 พบว่าในการดำเนินการทดสอบเตาทั้ง 3 รูปแบบนั้น ต่างมีค่าการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยเตา TLUD ที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวมีการใช้เชื้อเพลิงปริมาณน้อยที่สุด (2.279±0.049 kg) ถัดมาได้แก่ เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ (2.559±0.038 kg) และเตาที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว (2.981±0.140 kg) ตามลำดับ เนื่องจากเตา TLUD ที่ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว ไม่ได้ใช้ระบบบังคับลมทำให้มีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุด

จากการทดสอบและนำไปเปรียบเทียบกับสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด TLUD แต่ละชนิด พบว่าเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะและค่าเวลาในการเดือดของน้ำดีกว่าแบบอื่น

เนื่องจากการใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟ ที่บริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้นั้นทำให้เปลวไฟเข้ามารวมที่จุดเดียวกันเกิดกระบวนเผาไหม้บริเวณปากเตาได้ดี ส่วนการใช้บังคับระบบลมเข้ามายังช่วยในการเร่งกระบวนการเผาไหม้ได้อย่างดี

ส่วนเตาชีวมวลที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว มีค่าอัตราการเผาไหม้และกำลังไฟ (52.72 ± 1.48 g/min และ 13.59 ± 0.38 kW ตามลำดับ) ดีกว่าแบบอื่น เนื่องจากด้านบนของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณปากเตาไม่มีการลดปริมาณอากาศจากแผ่นควบคุมเปลวไฟ ทำให้เกิดการเผาไหม้บริเวณนั้นได้ดีกว่าอีก 2 แบบ

เตาชีวมวลที่ใช้ แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานจำเพาะปานกลาง เนื่องจากบริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้ใช้แผ่นควบคุมเปลวไฟ ในการควบคุมการกระจายของเปลวไฟจากห้องเผาไหม้สู่ภายนอก สำหรับในส่วนของการอัตราการเผาไหม้ กำลังไฟ และเวลาในการเดือดของน้ำมีค่าต่ำสุดเนื่องจากไม่ได้ใช้ระบบบังคับลมช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

4. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิด TLUD กับงานวิจัยอื่น

จากผลการศึกษาเตาชีวมวลชนิด TLUD ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้นำไปเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเตาชนิดอื่นๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า

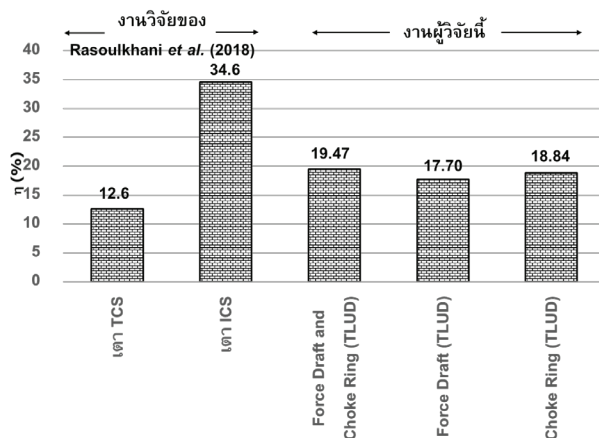


Figure 12 Comparing thermal efficiency with other stoves (Rasoulkhani *et al.*, 2018)

จากงานวิจัยของ Rasoulkhani *et al.* (2018) ซึ่งทำการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแต่ละชนิด พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เตา TLUD ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว และ เตา TLUD ใช้

แผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตา TCS (traditional cook stove) ซึ่งเป็นเตาที่ทำจากก้อนอิฐ 3 ก้อน จัดเรียงกันเป็นรูปตัวยู ทำให้เกิดช่องว่างของช่องเดิมเชื้อเพลิง ส่งผลให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องเผาไหม้เกิดการรั่วไหลออกมาจากห้องเผาไหม้ แต่ในขณะที่เตา ICS (improved biomass cooking stove) มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตา TLUD ทั้ง 3 รูปแบบที่พัฒนาขึ้นมา ทั้งนี้เตา ICS มีขนาดห้องเผาไหม้ที่เล็ก ทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พลชัย ขาวนวล และคณะ (2561) ที่พบว่าห้องเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามเตา ICS มีค่ากำลังไฟที่ 5.5 kW ซึ่งต่ำกว่าเตา TLUD ทั้ง 3 รูปแบบ ทำให้เตา TLUD ทั้ง 3 รูปแบบเหมาะกับงานที่ต้องใช้กำลังไฟสูงและต่อเนื่องได้ดีกว่า

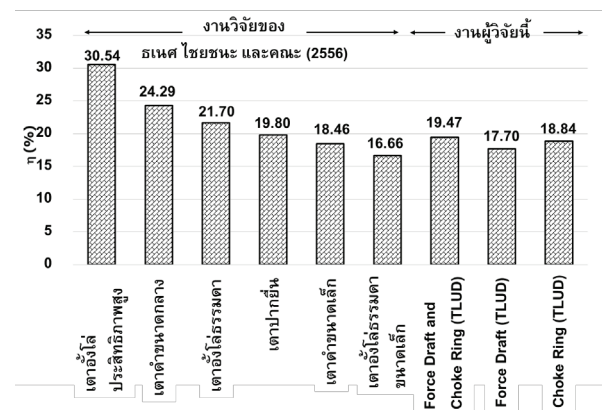


Figure 13 Comparing thermal efficiency with other stoves (ธเนศ ไชยชนะ และคณะ, 2556)

ส่วนงานวิจัยของธเนศ ไชยชนะ และคณะ (2556) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เตา TLUD ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว และเตา TLUD ใช้ แผ่นควบคุมเปลวไฟ เพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกับเตาปากยื่น เตาเตาขนาดเล็กและเตาอั้งโล่ธรรมดาขนาดเล็ก แต่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้อยกว่าเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง เตาเตาขนาดกลาง และเตาอั้งโล่ธรรมดา เนื่องจากเตา TLUD ทั้ง 3 แบบ ที่ทำการพัฒนาขึ้นมามีขนาดห้องเผาไหม้ที่ใหญ่กว่าเตาที่ได้กล่าวมา ทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องด้วยขนาดของห้องเผาไหม้มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (พลชัย ขาวนวล และคณะ, 2561) กล่าวคือ เมื่อห้องเผาไหม้มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลง แต่มีกำลังไฟสูงขึ้น อีกทั้งเตา TLUD ดังกล่าวใช้แผ่นโลหะเป็นองค์ประกอบใน

ทุกส่วน ในขณะที่เตาที่นำมาเปรียบทำจากดินเหนียวเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเนื่องจากการใช้วัสดุฉนวนความร้อนกับเตาชีวมวลส่งผลให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่า (Kore *et al.*, 2023)

ทั้งนี้การเพิ่มแผ่นควบคุมเปลวไฟและระบบบังคับลมช่วยในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นในงานวิจัยนี้จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก แผ่นควบคุมเปลวไฟมีหน้าที่ควบคุมเปลวไฟและระบบบังคับลมมีหน้าที่เร่งการเผาไหม้ แต่จะส่งผลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นขณะเดียวกันการใช้ระบบลมช่วยในการเผาไหม้จะส่งผลให้ระยะเวลาใช้งานสั้นลงตามไปด้วย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

เตาชีวมวลชนิด TLUD ถูกพัฒนาโดยการเพิ่มแผ่นควบคุมเปลวไฟและระบบบังคับลมเข้าสู่เตา โดยพบว่าทิศทางของลมที่ออกจากระบบบังคับลมไปสู่เตานั้น มุม 45° กับแนวระดับจะให้ผลดีที่สุด สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด TLUD ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ เตา TLUD ที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟ เตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลม เพียงอย่างเดียว และเตา TLUD ที่ใช้ระบบแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว พบว่า เตาที่ใช้ทั้งระบบบังคับลมร่วมกับแผ่นควบคุมเปลวไฟมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่าเตาที่ใช้ แผ่นควบคุมเปลวไฟ และระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว แต่จะเห็นได้ว่าเตา TLUD ที่ใช้ระบบแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่าเตา TLUD ที่ใช้ระบบบังคับลมเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแผ่นควบคุมเปลวไฟให้กับเตาจะทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้ระบบบังคับลม ซึ่งเตา TLUD ที่ใช้ระบบแผ่นควบคุมเปลวไฟเพียงอย่างเดียวมีข้อได้เปรียบเรื่องการประหยัดเชื้อเพลิงชีวมวล ประหยัดพลังงานไฟฟ้า ลดต้นทุนอุปกรณ์บังคับลมได้แก่ ช่องปล่อยลม พัดลม อุปกรณ์จ่ายไฟสำหรับระบบบังคับลม และเตาดังกล่าวยังมีความสะดวกในการใช้งานได้ดีกว่าเตาอีก 2 รูปแบบ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้งานในที่ที่มีพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ระบบบังคับลมทำงาน

2. ข้อเสนอแนะ

เตาชีวมวลชนิด TLUD ที่พัฒนาขึ้นมานี้ มีกำลังไฟที่สูง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้พลังงานความร้อนที่สูง และใช้เวลานานและต่อเนื่อง เช่น งานอุตสาหกรรมครัวเรือนในการทำขนม การนึ่งขนม การนึ่งข้าว การผลิตไอน้ำ เป็นต้น แต่ไม่เหมาะสำหรับงานที่ใช้ความร้อนเป็นระยะเวลาดสั้นๆ เช่น การอุ่นอาหารที่ใช้เวลาเพียงเล็กน้อยเพื่อนำมารับประทานใหม่อีกครั้ง

เนื่องจากการเริ่มต้นจุดเตาต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลตั้งต้นค่อนข้างมาก

ในการวิจัยครั้งถัดไปควรออกแบบระบบบังคับให้สามารถปรับมุมได้อย่างอิสระเพื่อศึกษาการควบคุมทิศทางอื่น เช่น 30° และ 60° เป็นต้น และเนื่องจากการใช้ระบบบังคับลมและแผ่นควบคุมเปลวไฟส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น ในการวิจัยครั้งต่อไปสามารถนำเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูงมาพัฒนาต่อโดยการศึกษากการบังคับลมและแผ่นควบคุมเปลวไฟ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2563

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558, กันยายน). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579*. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. <https://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2015.pdf>
- ธเนศ ไชยชนะ, หมะกรือซม อาลี, และมัสยา หลงสมัน. (2556). การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มระดับครัวเรือน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 32(5), 626-630.
- พลชัย ขาวนวล, สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์, และสุปราณี วุ่นศรี. (2561). ปัจจัยของขนาดห้องเผาไหม้และความชื้นเชื้อเพลิงที่ผลต่อสมรรถนะเตาชีวมวลชนิด Top-Lit Up-Draft (TLUD). *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 28*, 983-992.
- สมมาส แก้วล้วน, ดำรงค์ศักดิ์ จันโทสี, สุรัชย์ จันท์ศรี, และเวจิน ปิยรัตน์. (2556). การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 8(1), 24-33.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2567, กรกฎาคม). *ตารางแสดงรายละเอียดยางพารา*. <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/houseland%2065.pdf>
- สุปราณี วุ่นศรี, พลชัย ขาวนวล, นพดล โพธิ์กาเหน็ด, โกสินทร์ ธิปรักษพันธ์, ณิชยา ประสงค์จันทร์, ภัทราภา จ้อยพจน์, และระริน เครือวรพันธุ์. (2566). การประยุกต์ใช้เตาชีวมวลชนิด Top-Lit Up-Draft (TLUD) ในการย้อมสีเตยหนามด้วยสารธรรมชาติ. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 14(2), 167-178.

- Bentson, S., Evitt, D., Lieberman, D., & MacCarty, N. (2024). Retrofitting stoves with forced jets of primary air improves speed, emissions, and efficiency: Evidence from six types of biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, 71, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.10.010>
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Boafo-Mensah, G., Neba, F. A., Tornyeviadzi, H. M., Seidu, R., Darkwa, K. M., & Kemausour, F. (2021). Modelling the performance potential of forced and natural-draft biomass cookstoves using a hybrid Entropy-TOPSIS approach. *Biomass and Bioenergy*, 150, 106121. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106121>
- Hailu, A. (2022). Development and performance analysis of top lit updraft: Natural draft gasifier stoves with various feed stocks. *Heliyon*, 8(12), e12040. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12040>
- Huangfu, Y., Li, H., Chen, X., Xue, C., Chen, C., & Liu, G. (2014). Effect of moisture content in fuel on thermal performance and emission of biomass semi-gasified cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 21, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.05.007>
- Kore, S., Sutar, K., & Waghmare, A. (2023). Development of a natural draft metal biomass cookstove for community kitchen. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 102(2), 17-36. <https://doi.org/10.37934/arfmts.102.2.1736>
- MacCarty, N., Ross, G., Lefebvre, O., & Morris, A. (2024). Saving time and reducing smoke: A sensor-based performance assessment of a forced-draft “Jet-Flame” cooking system in Malawi. *Energy for Sustainable Development*, 80, 101438. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101438>
- Oyelaran, O. A., Bolaji, B. O., Waheed, M. A., & Adekunle, M. F. (2015). Performance evaluation of the effect of binder on groundnut shell briquette. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, 8(1), 11–19. <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2015.01.002>
- Rasoulkhani, M., Ebrahimi-Nik, M., Abbaspour-Fard, M. H., & Rohani, A. (2018). Comparative evaluation of the performance of an improved biomass cook stove and the traditional stoves of Iran. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 438-443. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.09.003>
- Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., Narra, S., Saleh, A., Sanfo, S., Isiaka, M., Dalha, I. B., & Abdulsalam, M. (2023). Biomass cookstoves: A review of technical aspects and recent advances. *Energy Nexus*, 11, 100222. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100222>

การศึกษาเทคนิคการทำให้ปรากฏขึ้นและระยะเวลาคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

Study of the techniques for enhancing the visibility and durability period of latent fingerprints on melamine-coated wood

ณิชา วงศ์สองจำ^{1*}, ญาดาณัฐ อรุณรัตน์¹, อาเรรัตน์ บุญดวง¹, วลัยพร ผ่องแผ้ว²,

วรวัช วิชชุวานิชย์³ และ อัจฉรา คำยา⁴

Nich Wongsongja^{1*}, Yadanat Arunrat¹, Areerat Boontuang¹, Walaiporn Phonphan²,

Woratouch Witchuvanit³ and Ajchara Khamya⁴

Received: 13 July 2024 ; Revised: 23 August 2024 ; Accepted: 8 October 2024

บทคัดย่อ

การก่อเหตุอาชญากรรมในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นคดีเกี่ยวกับทรัพย์สิน เพศ และชีวิต ผู้ก่อเหตุก็มักจะทิ้งร่องรอยหลักฐานที่สำคัญทางด้านนิติวิทยาศาสตร์คือ รอยลายนิ้วมือ และมักเกิดเหตุภายในบ้านหรืออาคารจากการรื้อค้นเพื่อหาทรัพย์สินจากเฟอร์นิเจอร์ที่ใช้ภายในบ้าน ส่วนใหญ่มักผลิตมาจากไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน เนื่องจากไม้อัดมีผิวที่แข็งแรง ทนความร้อนและไอน้ำ จึงเหมาะต่อการนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ได้อย่างดี โดยการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมและเปรียบเทียบคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงกับระยะเวลาบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน (สีโอ๊คดำ) ได้แก่ 1) เทคนิคบัตผงฝุ่นสีเหลือง 2) เทคนิคบัตผงฝุ่นแม่เหล็ก 3) เทคนิคโรตามีน 6จี และ 4) เทคนิคเบสิก เบลโล 40 บนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนตามระยะเวลา ได้แก่ ทันทัน, 6 ชั่วโมง, 7, 5, 3, 1, 14 และ 28 วัน จากนั้น นำรอยลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏทดสอบนับจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษด้วยระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS) และนำผลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์การทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) ผลการวิจัยพบว่า เทคนิคที่เหมาะสมต่อคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนด้วยเทคนิคโรตามีน 6จี มีระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงที่เหมาะสมเป็นอันดับแรก รองลงมา คือ เทคนิคเบสิก เบลโล 40 เทคนิคบัตผงฝุ่นแม่เหล็ก และเทคนิคบัตผงฝุ่นสีเหลือง ตามลำดับ แม้เวลาจะผ่านไปนานถึง 28 วัน ก็ยังสามารถตรวจพบรอยลายนิ้วมือแฝงได้ และผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝง พบว่า เทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 (Chi-square = 53.224, p = 0.000) ระยะเวลาการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 (Chi-square = 30.778, p = 0.327) และเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันและระยะเวลาต่างกันมีปฏิสัมพันธ์ร่วมที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน (F = 7.425, p = 0.000) ผลจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้สามารถประเมินการเลือกเทคนิคในการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงโดยใช้หลักการของสารย้อมสีเรืองแสง คือ โรตามีน 6จี และเบสิก เบลโล 40 ซึ่งเป็นสารเรืองแสงที่มีความคงทนเป็นพิเศษและระยะเวลาจะผ่านไปนานถึง 28 วัน ก็ยังสามารถตรวจพบรอยลายนิ้วมือแฝงได้ ซึ่งผลการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการเลือกเทคนิคในการหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: รอยลายนิ้วมือแฝง, ไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน, จุดลักษณะสำคัญพิเศษ, เทคนิคโรตามีน 6จี, เทคนิคเบสิก เบลโล 40

¹ สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

³ คณะนิติวิทยาศาสตร์, โรงเรียนนายร้อยตำรวจ

⁴ คณะแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Forensic Science Program, Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

² Environmental Science and Technology Program, Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

³ Faculty of Forensic Science, Royal Police Cadet Academy

⁴ Faculty of Medicine, Mahasarakham University, Mahasarakham

Abstract

The majority of criminal activities in Thailand involve property crimes, sexual offenses, and life-threatening cases. Perpetrators often leave behind crucial forensic evidence, particularly fingerprints. Such incidents typically occur within homes or buildings as perpetrators search for valuables from household furniture, which is often made from melamine-coated plywood. Melamine-coated plywood is known for its durable surface, heat, and steam resistance, making it an excellent material for furniture production. This research aims to study appropriate techniques and compare the quality of latent fingerprints using various detection techniques and their durability periods on oak-colored, melamine-coated plywood. The techniques studied include yellow powder dusting, magnetic powder dusting, Rhodamine 6G, and Basic Yellow 40, with time intervals of immediately, 6 hours, 1, 3, 5, 7, 14, and 28 days. The latent fingerprints obtained were then analyzed using the Automated Fingerprint Identification System (AFIS) to count the number of minutiae points. The results were statistically analyzed using Chi-square tests and two-way analysis of variance. The research findings indicate that Rhodamine 6G is the most suitable technique for detecting latent fingerprints on melamine-coated plywood, followed by Basic Yellow 40, magnetic powder dusting, and yellow powder dusting, respectively. It was also found that latent fingerprints remained detectable even after 28 days. The comparison of fingerprint quality revealed significant differences in the effectiveness of different detection techniques at the 0.05 level (Chi-square = 53.224, $p = 0.000$). However, the time intervals did not show significant differences in fingerprint quality at the 0.05 level (Chi-square = 30.778, $p = 0.327$). Furthermore, there was an interaction effect between the detection techniques and time intervals that influenced the quality of latent fingerprint detection on melamine-coated plywood ($F = 7.425$, $p = 0.000$). This study provides insights into selecting appropriate techniques for latent fingerprint detection, particularly highlighting the use of fluorescent dye principles with Rhodamine 6G and Basic Yellow 40, which offer exceptional durability. The findings serve as a guideline for selecting suitable techniques for detecting latent fingerprints on melamine-coated plywood.

Keywords: Latent fingerprint, melamine-coated wood, minutiae, Rhodamine 6G, Basic Yellow 40

บทนำ

การก่อเหตุในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นคดีเกี่ยวกับทรัพย์สิน และชีวิต ซึ่งคดีดังกล่าวมาในข้างต้นนั้นผู้ก่อเหตุก็มักจะทิ้งร่องรอยหลักฐานไว้เสมอ ส่งผลให้การสืบสวน สอบสวนสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยหนึ่งในพยานหลักฐานที่สำคัญทางด้านนิติวิทยาศาสตร์คือ รอยลายนิ้วมือ (fingerprints)

ในคดีที่กล่าวมาข้างต้นมักเกิดเหตุภายในบ้านหรืออาคาร ร่องรอยที่เกิดเหตุส่วนใหญ่จะเกิดจากการรื้อค้นเพื่อหาทรัพย์สิน โดยการรื้อค้นมักเกิดขึ้นกับเฟอร์นิเจอร์ที่ใช้ภายในบ้าน เช่น ตู้เสื้อผ้า ตู้เก็บของ โต๊ะเครื่องแป้ง เป็นต้น ส่วนใหญ่เฟอร์นิเจอร์ในประเทศไทยมักผลิตมาจากไม้อัด โดยไม้อัดที่นิยมใช้คือ ไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน เนื่องจากไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนมีผิวที่แข็งแรงมาก อีกทั้งยังสามารถทนความร้อนและไอน้ำได้เหมาะต่อการนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ได้อย่างดี ทำให้สามารถพบไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนได้ทั่วไป จึงมีความเป็นไปได้ว่าถ้าหากเกิดการก่ออาชญากรรม รอยลายนิ้วมืออาจปรากฏอยู่บนส่วนใดส่วนหนึ่งของเฟอร์นิเจอร์ได้

การสืบสวนสอบสวนในเบื้องต้นเมื่อเข้าไปยังสถานที่เกิดเหตุ เจ้าพนักงานที่ทำการตรวจมักจะหาร่องรอยลายนิ้วมือแฝงเป็นอันดับต้นๆ โดยลายนิ้วมือในสถานที่เกิดเหตุ

มี 2 ลักษณะ คือ ลายนิ้วมือที่มองเห็นและมองไม่เห็น ลายนิ้วมือส่วนมากที่พบจะเป็นรอยนิ้วมือที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า (Latent Fingerprint) มีเพียงส่วนน้อยที่จะมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น รอยลายนิ้วมือที่เกิดขึ้นบนฝุ่นหรือรอยลายนิ้วมือบนคราบเลือด (วัลลภ เสมาทอง และศุภชัย ศุภลักษณ์นารี, 2555) ซึ่งรอยลายนิ้วมือแฝงสามารถใช้เป็นพยานหลักฐานเชื่อมโยงถึงเจ้าของรอยลายนิ้วมือนั้นได้ เนื่องจากลายนิ้วมือจะมีลักษณะเฉพาะไม่เหมือนกันแม้จะเป็นแฝดที่เกิดจากไข่ใบเดียวกันก็ตาม และไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดชีวิต ทำให้สามารถใช้การยืนยันว่าบุคคลดังกล่าวได้กระทำความผิดหรือเกี่ยวข้องกับการกระทำความผิดหรือไม่ (ปิ่นอนงค์ ตรีเทพชาญชัย, 2558)

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงโดยใช้เทคนิคและระยะเวลาที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิคในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนในระยะเวลาที่ต่างกัน ผลจากการศึกษาในครั้งนี้จะทำให้สามารถประเมินเบื้องต้นได้ว่าไม้เคลือบผิวเมลามีนที่ระยะเวลาใดเหมาะสมกับเทคนิคไหนมากที่สุด เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโอกาสต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมต่อคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงกับระยะเวลาบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

บททวนวรรณกรรม

1. รอยลายนิ้วมือในสถานที่เกิดเหตุ

รอยลายนิ้วมือในที่ที่เกิดเหตุ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ลายนิ้วมือที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible Fingerprint) เป็นลายนิ้วมือที่เกิดจากนิ้วมือที่เปื้อนเลือด ผื่น น้ำมัน หรือสารอื่นๆ สัมผัสกับวัตถุเป็นลักษณะ 2 มิติ หรือรอยลายนิ้วมือที่ประทับลงบนวัตถุอ่อนนุ่ม จะเห็นเป็นลักษณะ 3 มิติ และลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นหรือมองเห็นได้ยากด้วยตาเปล่า (Latent Fingerprint) ลายนิ้วมือชนิดนี้พบมากที่สุด ในสถานที่เกิดเหตุ เช่น ลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นกระจก ลายนิ้วมือแฝงบนกระดาด เป็นต้น (เอกจิตรา มีไชยธร, 2551)

2. ไม้อัดเคลือบเมลามีน

การนำไม้หรือไม้อัดแผ่นบางๆ หลายแผ่นมาอัดเข้าด้วยกัน โดยใช้กาวเป็นวัสดุยึดติดมาปิดผิวด้วยเมลามีน (melamine) ดัง Figure 1 มีสูตรทางเคมีว่า $C_3H_6N_6$ เมื่อนำเมลามีนมาผสมกับฟอรัมาลดีไฮด์จะได้เป็นเมลามีนเรซิน (melamine resin) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยความร้อนและมีความทนทานมากเพื่อเคลือบผิวของไม้นั้นให้เกิดลวดลายคุณสมบัติทนทานต่อรอยขีดข่วน แรงขัด การเกาะติดของคราบสกปรก ความร้อนและไอน้ำ ทนต่อการแตกกร้าวของพื้นผิว พื้นผิวมีความหนาแน่น แข็งแรง สามารถเช็ดทำความสะอาดได้ง่าย นิยมนำมาผลิตเฟอร์นิเจอร์ บิวท์อิน หรือสามารถนำมาใช้งานทดแทนวัสดุอื่นๆ ได้ เช่น ลามิเนต หินอ่อน ฯลฯ ทดแทนวัสดุบางชนิดอาจมีที่ราคาสูงกว่า (บริษัท เมลามีนอาร์ท จำกัด, 2567)

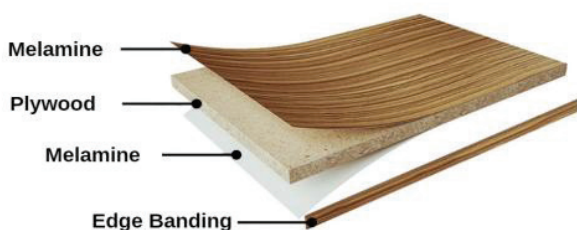


Figure 1 Melamine coating wood layer

3. หลักการทำให้ลายนิ้วมือแฝงปรากฏ

การที่จะทำให้รอยลายนิ้วมือแฝงปรากฏขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายเทคนิควิธี ได้แก่

3.1 เทคนิคทางฟิสิกส์

(1) เทคนิคปิดผงฝุ่น ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เรซินโพลีเมอร์สำหรับการช่วยให้ผงฝุ่นยึดติดบนพื้นผิว และสีสำหรับการช่วยทำให้ลายนิ้วมือมีความคมชัดขึ้น (ปิ่นอนงค์ ตรีเทพชาญชัย, 2558) โดยมีหลักการ คือ นำอนุภาคของฝุ่นให้ไปติดกับคราบเหงื่อจากรอยนิ้วมือ ดังนั้น ฝุ่นที่เลือกใช้จำเป็นต้องมีสีที่ติดกับพื้นผิวของวัตถุเพื่อการมองเห็นที่ชัดเจน

(2) เทคนิคผงฝุ่นแม่เหล็ก เป็นผงฝุ่นที่มีส่วนผสมของเหล็กเนื้อละเอียด ส่วนประกอบพื้นฐานคือ ไอออนออกไซด์กับผงฝุ่นแม่เหล็ก ร่วมกับสารประกอบสีอื่นๆ (ปิ่นอนงค์ ตรีเทพชาญชัย, 2558) สามารถใช้ได้กับพื้นผิวขรุขระ พื้นผิวที่เป็นลาย รู รอยร้าวหรือเงามัน เช่น หนัง แก้ว ยางหรือพลาสติก (โสภา คชนุต, 2560)

3.2 เทคนิคทางเคมี

อาศัยหลักการทางเคมีคือ ห้องค์ประกอบในสารเคมีทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่ขับออกมาทางนิ้วมือหรือเลือดและทำให้เกิดการเปลี่ยนสี (โสภา คชนุต, 2560)

(1) เทคนิคซูเปอร์กลูหรือไซยาโนอะคริเลต เหมาะกับของกลางประเภทเครื่องหนัง กระดาด แก้ว ผ้า และโลหะต่างๆ เป็นต้น ซูเปอร์กลู ซึ่งมีส่วนผสมของสารไซยาโนอะคริเลตเอสเทอร์ (cyanoacrylate ester) เมื่อสารนี้ได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไอทำปฏิกิริยากับโปรตีนและน้ำในเหงื่อ ทำให้รอยลายนิ้วมือ ฝ่ามือ ฝ่าเท้าแฝงเปลี่ยนเป็นสีขาว

(2) เทคนิคโรดามีน 6จี เป็นสารเรืองแสงที่คงทนเป็นพิเศษสำหรับใช้กับไซยาโนอะคริเลต โดยโรดามีน 6จี จะจับตัวกับกาวไซยาโนอะคริเลต และทำการย้อมสีจากสีขาวให้กลายเป็นสีชมพูอ่อน ซึ่งมีคุณลักษณะเรืองแสงภายใต้แสงสีเขียวย โดยใช้การจุ่มหรือฉีดพ่น และไม่จำเป็นต้องล้างด้วยน้ำหลังการใช้เหมาะกับการใช้นิ้ววัตถุพื้นผิวแบบไม่มีรูพรุน ใช้คู่กับแว่นตาฟิเตอร์สีส้ม (BVDA International B.V., 2021)

(3) เทคนิคเบสิก เกลโล 40 เป็นสารเรืองแสง ซึ่งจะเรืองแสงภายใต้แสงสีม่วงจึงจำเป็นต้องใช้แว่นตาฟิเตอร์สีเหลืองเพื่อดูและถ่ายภาพเรืองแสง เมื่อฉีดสารละลายเบสิก เกลโล 40 ลงบนพื้นผิวที่ผ่าน การรมควันซูเปอร์กลูมาแล้ว รอยลายนิ้วมือที่มีไซยาโนอะคริเลตเคลือบอยู่จะดึงสีย้อมขึ้นมาทำให้เห็นภาพลายนิ้วมือจากนั้นจึงสามารถถ่ายภาพลายนิ้วมือ (BVDA International B.V., 2021)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โสภา คชนุต (2560) ได้ทำการศึกษาการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงบนก้อนหิน (หินแกรนิต หินแอนดีไซต์ หินยิปซัม หินกรวดมน หินปูน และหินศิลาแลง) ด้วยวิธีปิดด้วยผงฝุ่นแม่เหล็ก วิธีนินไฮดริน และวิธีการรมควีน ซูเปอร์กลู เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจหาลายนิ้วมือบนก้อนหินต่างชนิดกันที่เวลาทันที, 1 และ 3 ชั่วโมง พบว่าการปิดด้วยผงฝุ่นแม่เหล็กพบลายนิ้วมือแฝงบนหินทุกชนิดที่เวลาทันทีและ 1 ชั่วโมง โดยมีเฉพาะหินแกรนิตเท่านั้น ที่พบลายนิ้วมือแฝงที่เวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ส่วนนินไฮดรินและซูเปอร์กลูตรวจไม่พบลายนิ้วมือแฝงที่เวลาต่างๆ และการปิดด้วยผงฝุ่นแม่เหล็กให้คุณภาพของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ดีมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีนินไฮดรินและวิธีซูเปอร์กลู

เอกชัย ปริกมทะกุล และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือแฝงบนวัตถุพยานประเภทถุงพลาสติกสีดำแบบบางหรือถุงขยะแบบบาง แบ่งช่วงเวลาในการศึกษาเป็น 10 ช่วงเวลา และทำการรอบด้วยวิธีซูเปอร์กลูแล้วนำมาย้อมด้วยโรดามีน 6จี เมื่อย้อมและตากแห้งแล้วนำมาส่องแสงด้วยเครื่องโพลีไลต์ที่มีความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร ทำการถ่ายภาพแล้วมาวิเคราะห์จำนวนจุดลักษณะสำคัญบนรอยลายนิ้วมือแฝง ที่ปรากฏโดยใช้โปรแกรมตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมือนิตินมิติ พบว่า เมื่อประทับรอยลายนิ้วมือทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานขึ้นจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษมีแนวโน้มลดลงในช่วงวันที่ 0-7 วัน และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงวันที่ 14-28 วัน และจากผลการทดลองพบว่าถึงแม้ระยะเวลาประทับรอยลายนิ้วมือผ่านไปแล้ว 28 วัน รอยลายนิ้วมืองดงกล่าวยังมีจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่เพียงพอต่อการยืนยันตัวบุคคลได้

ณัฐชา สิงหารศรี (2563) ศึกษาวิธีการหารอยลายนิ้วมือแฝงบนฟิล์มโทรศัพท์มือถือที่จมอยู่ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้แก่ น้ำประปา น้ำจากแม่น้ำ และน้ำคลอง โดยนำฟิล์มโทรศัพท์มือถือ ที่มีการประทับรอยลายนิ้วมือและนำไปแช่ทิ้งไว้ในน้ำเป็นระยะเวลา 1, 14, 10, 7, 5, 3, 21 และ 28 วัน จากนั้นนำมาตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีผงฝุ่นดำ, ไซยาโนอะคริเลต, การใช้สารอนุภาคขนาดเล็ก และโรดามีน 6จี พบว่า ผงฝุ่นดำ สามารถตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงและนำมาตรวจเปรียบเทียบเพื่อยืนยันตัวบุคคลได้แม้ฟิล์มโทรศัพท์มือถือจะถูกแช่อยู่ในน้ำนานถึง 21 วัน ในขณะที่ไซยาโนอะคริเลต, การใช้สารอนุภาคขนาดเล็ก และโรดามีน 6จี สามารถตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงได้เมื่อแช่อยู่ในน้ำระยะเวลา 14, 5 และ 7 วัน ตามลำดับ

ดารณี เลยะกุล และคณะ (2563) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการปรากฏขึ้นของรอยลายนิ้ว

มือแฝงที่ประทับบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมในช่วงระยะเวลาเก็บรักษาที่แตกต่างกันโดยวิธีการปิดด้วยผงฝุ่นดำและทำการนับจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษด้วยเครื่องตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมือนิตินมิติ และยืนยันผลโดยเชี่ยวชาญทำการวิเคราะห์ผลคุณภาพรอยลายนิ้วมือทางสถิติ พบว่า รอยลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่มีการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 10 วัน ให้คุณภาพของลายนิ้วมือแฝงที่ดีที่สุดพบจำนวนจุดสำคัญพิเศษมากกว่าตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบการปรากฏขึ้นของรอยลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมโดยวิธีปิดด้วยผงฝุ่นดำจำแนกตามช่วงเวลา พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษารอยลายนิ้วมือแฝงที่แตกต่างกัน ไม่มีผลกับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงอย่างมีนัยสำคัญ

Stewart *et al.* (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเรืองแสงโดยใช้ไซยาโนอะคริเลต และข้อดีและข้อเสียของเทคนิคดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ 2 ขั้นตอน พบว่า กระบวนการแบบดั้งเดิมของการรมไซยาโนอะคริเลตตามด้วยการย้อมด้วยสีเหลืองพื้นฐานที่มีเอทานอล 40 โดยขั้นตอนแรกใช้การรมไซยาโนอะคริเลต และย้อมด้วยลูมิไซยาโน, พอลิไซยาโนยูวี โดยให้ผลที่ดีภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ทำให้แสดงภาพลายนิ้วมือใหม่ได้

การทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

ไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน (สีโอ๊คดำ) ขนาด 5x5 ซม. จำนวนทั้งหมด 96 ชิ้น แปรขนกระรอกและแปรงแม่เหล็ก ผงฝุ่นสีเหลือง (ยี่ห้อ BVDA) และผงฝุ่นแม่เหล็ก (ยี่ห้อ BVDA) กาวไซยาโนอะคริเลต และตู้อบซูเปอร์กลู

2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 การเตรียมสารโรดามีน 6จี (rhodamine 6G, R6G) ทำการเตรียม R6G HFE Stock Solution โดยชั่งผง R6G (ยี่ห้อ BVDA) 0.005 กรัม ละลายใน เมทานอล 500 มิลลิลิตร และตวงสารละลาย HFE-7100 (ยี่ห้อ 3M Novec HFE 7100) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร นำไปเติมลงใน R6G HFE Stock Solution ที่เตรียมไว้ในปริมาตร 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ทำการคนสารละลายให้เข้ากันจนกว่าจะผสมเข้ากันหมด

2.2 การเตรียมสารเบสิก เยลโล 40 (basic yellow 40, BY40) นำผงเบสิก เยลโล 40 (ยี่ห้อ BVDA) จำนวน 2 กรัม และเมทานอลปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ผสมกันจนกว่าผงเบสิก เยลโล 40 จะละลายหมด

3. วิธีการทดลอง

3.1 วิธีการเตรียมไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

ตัดไม้ขนาด 5x5 ซม. โดยทำการทดลอง 8 ชุด (4 เทคนิค x 3 ซ้ำ x 8 ช่วงเวลา) จำนวน 96 ชิ้น

3.2 วิธีการพิมพ์รอยลายนิ้วมือแฝง

ใช้อาสาสมัครเพศหญิง 1 ราย พิมพ์ลายนิ้วมือหัวแม่มือข้างขวา ลงบนไม้ โดยควบคุมแรงกดให้ได้ประมาณ 900-1,000 กรัม เวลาประมาณ 15 วินาที (กรณีการเอื้อทยาและคณะ, 2558) ประทับทิ้งไว้ตามช่วงระยะเวลาที่กำหนดของการทดลอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ผ่านการรับรองจริยธรรมในมนุษย์ เลขที่ COA.1-010/2024 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

3.3 วิธีการหารอยลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคต่าง ๆ

โดยวิธีการหารอยลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคต่างๆ จะดำเนินการทำซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ ดังนี้

3.3.1 เทคนิคปิดด้วยผงฝุ่นสีเหลือง นำไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนที่ผ่านการประทับลายนิ้วมือและครบกําหนดตามระยะเวลามาปิดด้วยผงฝุ่นสีเหลืองด้วยแปรงขนกระรอก

3.3.2 เทคนิคปิดด้วยผงฝุ่นแม่เหล็ก นำไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนที่ผ่านการประทับลายนิ้วมือและครบกําหนดตามระยะเวลามาปิดด้วยผงฝุ่นแม่เหล็กด้วยแปรงแม่เหล็ก

3.3.3 เทคนิคโรดามีน 6จี นำไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนที่ผ่านการประทับลายนิ้วมือและครบกําหนดตามระยะเวลามาเข้าสู่ตู้อบซูเปอร์กลู และนำมาย้อมด้วย โรดามีน 6จี รอให้แห้ง จากนั้นนำไปส่องด้วยเครื่อง โพลีไลท์ที่มีความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร ถ่ายภาพรอยลายนิ้วมือที่ปรากฏขึ้นโดยถ่ายผ่านแว่นตาฟิเตอร์สีส้ม

3.3.4 เทคนิคเบสิก เบลโล 40 นำไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนที่ผ่านการประทับลายนิ้วมือและครบกําหนดตามระยะเวลามาเข้าสู่ตู้อบซูเปอร์กลู และนำมาย้อมด้วยเบสิก เบลโล 40 ทิ้งไว้ประมาณ 20 วินาที แล้วล้างน้ำ โดยใช้ผ้าแบบไหลผ่านจากนั้นนำไปส่องด้วยเครื่อง โพลีไลท์ที่มีความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร ถ่ายภาพ รอยลายนิ้วมือที่ปรากฏขึ้นโดยถ่ายผ่านแว่นตาฟิเตอร์ สีเหลือง

3.4 ขั้นตอนการเตรียมผลการวิเคราะห์คุณภาพการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

ทำการถ่ายภาพรอยลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏขึ้นด้วยกล้องถ่ายรูปและปรับภาพรอยลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากภาพสีให้เป็นภาพขาว-ดำ เพื่อสะดวกต่อการนำไปนับจุดลักษณะสำคัญพิเศษด้วยระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS)

4. การวิเคราะห์ผล

4.1 การวิเคราะห์คุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝง

อาศัยเกณฑ์การแปลค่าคะแนนเฉลี่ยของจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae) ที่ตรวจพบโดยการนำจำนวนจุดพบสูงสุด คือ 71 จุด (เทคนิคเบสิก เบลโล 40) และจำนวนจุดพบต่ำสุด คือ 0 จุด (เทคนิค ผงฝุ่นแม่เหล็ก) นำมากำหนดเกณฑ์เป็นช่วงระดับ จำนวน 5 ระดับ เพื่อนำมาใช้อธิบายความหมายของระดับคุณภาพของการตรวจสอบรอยลายนิ้วมือแฝง ซึ่งมีวิธีคำนวณตามสูตรและแสดงใน Table 1 ดังนี้

$$\frac{71 (\text{จำนวนจุดพบสูงสุด}) - 0 (\text{จำนวนจุดพบต่ำสุด})}{5 (\text{จำนวนชั้น})} = 14.2$$

Table 1 Criteria for scores of the number of minutiae.

Number of minutiae	Grade	Quality level
56.84 - 71.00	A	Excellent
42.63 - 56.83	B	High
28.42 - 42.62	C	Medium
14.21 - 28.41	D	Moderate
00.00 - 14.20	E	Low

4.2 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ได้แก่ การทดสอบ Chi-square test เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคกับระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝง และทดสอบระยะเวลากับระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) จาก 2 ปัจจัย คือ เทคนิค ระยะเวลา, และปฏิสัมพันธ์ของเทคนิคและระยะเวลา) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยการวิเคราะห์ Tukey's HSD โดยกำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติอยู่ที่ $p < 0.05$ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistic 29 โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

เทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝง

H_0 = เทคนิคต่างกันระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงไม่แตกต่างกัน

H_1 = เทคนิคต่างกันระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงแตกต่างกัน

ระยะเวลาการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝง

H_0 = ระยะเวลาต่างกันระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงไม่แตกต่างกัน

H_1 = ระยะเวลาต่างกันระดับคุณภาพรอยลายนิ้วมือ
แฝงแตกต่างกัน

**เทคนิคและระยะเวลาการตรวจเก็บรอยลาย
นิ้วมือแฝง**

H_0 = เทคนิคและระยะเวลาต่างกันไม่มีปฏิสัมพันธ์
ร่วมที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝง

H_1 = เทคนิคและระยะเวลาต่างกันมีปฏิสัมพันธ์ร่วม
ที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝง

ผลการทดลอง

1. ผลการศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงด้วย เทคนิคต่าง ๆ

1.1 เทคนิคปัดผงฝุ่นสีเหลือง พบว่า ระยะเวลาทันที
มีความคมชัดของลายนิ้วมืออยู่ระดับต่ำและระยะเวลานานระดับ
ต่ำมาก

1.2 เทคนิคปัดผงฝุ่นแม่เหล็ก พบว่า ระยะเวลาทันที
มีความคมชัดของลายนิ้วมืออยู่ระดับสูง 6 ชั่วโมง และ 1 วัน
ระดับปานกลาง และระยะเวลา 3, 5, 7, 14 และ 28 วันระดับ
ต่ำมาก

1.3 เทคนิคโรดามีน 6จี พบว่า ระยะเวลา 6 ชั่วโมง
มีความคมชัดของลายนิ้วมืออยู่ในระดับสูงมาก ในระยะเวลา
ทันที, 1, 3, 14 และ 28 วัน ระดับสูง และระยะเวลา 5 และ 7
วัน ระดับปานกลาง

1.4 เทคนิคเบสิก เบลโล 40 พบว่า ระยะเวลา 6
ชั่วโมง, 3 และ 5 วัน มีความคมชัดของลายนิ้วมืออยู่ระดับสูง
ระยะเวลา 1, 7 และ 14 วัน ระดับปานกลาง ระยะเวลาทันที
ระดับต่ำ และระยะเวลา 28 วัน ระดับต่ำมาก โดยแสดงผลใน
Table 2

2. ผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝง ด้วยเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝง กับระยะ เวลาบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

จากผลการศึกษาคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงสามารถ
นำผลการศึกษาไปวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์
Chi-square test และการวิเคราะห์ Two-way analysis of
variance โดยแสดงผลดัง Table 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ
พบว่า Chi-square = 53.224, $p = 0.000^*$ ดังนั้นจากสมมติฐาน
ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 กล่าวได้ว่า เทคนิคการตรวจเก็บ
รอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอย
ลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนแตกต่างกัน

จาก Table 4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า
Chi-square = 30.778, $p = 0.327$ ดังนั้นจากสมมติฐานยอมรับ
 H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวได้ว่า ระยะเวลาการตรวจเก็บรอยลาย
นิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือ
แฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนไม่แตกต่างกัน

Table 2 Study of the techniques for enhancing the visibility and durability period of latent fingerprints on melamine-coated wood

Techniques	Yellow Powder		Magnetic powder		Rhodamine 6G		Basic Yellow 40	
Durability Period	$\bar{x}$	Grade	$\bar{x}$	Grade	$\bar{x}$	Grade	$\bar{x}$	Grade
Immediately	24.67	D	52.00	B	44.67	B	14.33	D
6 hr.	5.00	E	40.00	C	60.33	A	53.33	B
1 day	00.00	E	39.67	C	52.00	B	40.67	C
3 days	00.00	E	00.33	E	51.00	B	56.00	B
5 days	8.67	E	1.00	E	40.00	C	47.33	B
7 days	11.67	E	4.33	E	33.00	C	36.67	C
14 days	00.00	E	5.33	E	48.67	B	29.33	C
28 days	0.33	E	00.00	E	45.00	B	9.22	E

Table 3 Results of a comparative study of the quality of latent fingerprint with techniques on melamine-coated plywood using Chi-square.

Techniques	Level of latent fingerprints					Total	Chi-square	Asymp. Sig. (2-sided)
	E	D	C	B	A			
Yellow Powder	19	3	1	1	0	24	53.224	0.000*
	19.8%	3.1%	1.0%	1.0%	0.0%	25.0%		
Magnetic powder	15	1	2	6	0	24		
	15.6%	1.0%	2.1%	6.3%	0.0%	25.0%		
Rhodamine 6G	0	2	4	12	6	24		
	0.0%	2.1%	4.2%	12.5%	6.3%	25.0%		
Basic Yellow 40	3	4	5	7	5	24		
	3.1%	4.2%	5.2%	7.3%	5.2%	25.0%		
Total	37	10	12	26	11	96		
	38.5%	10.4%	12.5%	27.1%	11.5%	100.0%		

Table 4 Results of a comparative study of the quality of latent fingerprint with durability period on melamine-coated plywood using Chi-square.

Durability Period	Level of latent fingerprints					Total	Chi-square	Asymp. Sig. (2-sided)
	E	D	C	B	A			
Immediately	2	3	1	6	0	12	30.778	0.327
	2.1%	3.1%	1.0%	6.3%	0.0%	12.5%		
6 hr.	3	1	0	4	4	12		
	3.1%	1.0%	0.0%	4.2%	4.2%	12.5%		
1 day	3	1	2	4	2	12		
	3.1%	1.0%	2.1%	4.2%	2.1%	12.5%		
3 days	5	1	2	1	3	12		
	5.2%	1.0%	2.1%	1.0%	3.1%	12.5%		
5 days	5	1	2	3	1	12		
	5.2%	1.0%	2.1%	3.1%	1.0%	12.5%		
7 days	6	1	3	2	0	12		
	6.3%	1.0%	3.1%	2.1%	0.0%	12.5%		
14 days	6	2	0	3	1	12		
	6.3%	2.1%	0.0%	3.1%	1.0%	12.5%		
28 days	7	0	2	3	0	12		
	7.3%	0.0%	2.1%	3.1%	0.0%	12.5%		
Total	37	10	12	26	11	96		
	38.5%	10.4%	12.5%	27.1%	11.5%	100.0%		

Table 5 Results of study of the techniques for enhancing the visibility and durability period of latent fingerprints on melamine-coated wood using Two-way analysis of variance

Source of variation	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Technique* Durability Period	167.833	31	5.414		
Error	46.667	64	.729	7.425	0.000*
Total	214.500	95			

จาก Table 5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ Two-way analysis of variance พบว่า $F = 7.425$ และ ค่า $p = 0.000^*$ ดังนั้น จากสมมติฐานปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 แสดงว่า เทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแตกต่างกันและระยะเวลาต่างก็มีปฏิสัมพันธ์ร่วมที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

อภิปรายผล

จากการศึกษาเทคนิคการทำให้ปรากฏขึ้นและระยะเวลาการคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนโดยเลือกสีโอ๊คดำ ซึ่งมีสีของพื้นหลังเป็นสีดำเข้มจึงทำให้เทคนิคการบดผงฝุ่นสีดำไม่ชัดเจนเพราะมีสีใกล้เคียงกับพื้นผิวผู้วิจัยจึงได้เลือกผงฝุ่นสี (สีเหลือง) และเทคนิคโรดามีน 6จี และเบสิก เกลโล 40 ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการของการย้อมสีเรืองแสงทำให้มองเห็นรอยลายนิ้วมือแฝงได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเทคนิคต่างๆ จะขึ้นอยู่กับหลักการทางฟิสิกส์หรือทางเคมีในการเลือกใช้เทคนิคผงฝุ่นซึ่งมีหลายสีให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับสีของพื้นผิววัตถุที่มีพื้นผิวเรียบมัน ไม่ดูดซึม และไม่เปื่อยก โดยขนาดเฉลี่ยของผงฝุ่นอยู่ที่ 20-30 ไมครอน และเทคนิคบดผงฝุ่นแม่เหล็กเป็นผงฝุ่นที่มีส่วนผสมของโลหะเหล็กเนื้อละเอียดขนาดเฉลี่ยของผงฝุ่นอยู่ที่ 11-18 ไมครอน ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงจากพื้นผิวต่างๆ เช่น ผนัง พลาสติก ผนัง และผิวหนังของมนุษย์ (โสภา คชนุต, 2560) ซึ่งต้องใช้คู่กับแปรงแม่เหล็ก การใช้แปรงแม่เหล็กนี้ให้ผลดีมากโดยเฉพาะกับการหารอยที่ด้านใต้วัตถุ เช่น ใต้ลิ้นชักหรือเมื่อพื้นผิววัตถุมีความยึดหยุ่นได้ (ปีนอนค์ ตรีเทพชาญชัย, 2558) และเทคนิคโรดามีน 6จี กับเทคนิคเบสิก เกลโล 40 เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการของสารย้อมสีเรืองแสง ซึ่งเป็นสารเรืองแสงที่มีความคงทนเป็นพิเศษเมื่อใช้คู่กับการรมควันซูเปอร์กลู โดยทั้งสองเทคนิคนี้เหมาะกับวัตถุที่เป็นประเภทเครื่องหนัง กระดาษ แก้ว ผ้า และโลหะต่างๆ

จากผลการศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคต่างๆ ที่เหมาะสม พบว่า การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคโรดามีน 6จี สามารถตรวจหาจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษและประเมินคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่มีระดับคุณภาพอยู่ในระดับสูงมากถึงปานกลาง ซึ่งเทคนิค

โรดามีน 6จี เป็นเทคนิคที่ใช้ร่วมกับการรมควันซูเปอร์กลู โดยโรดามีน 6จี มีคุณสมบัติเป็นสารเรืองแสงที่คงทนเป็นพิเศษสำหรับใช้กับโซยาโนอะคริเลต และยังทำให้เห็นรอยลายนิ้วมือชัดเจนขึ้นซึ่งสอดคล้องกับเอกชัย ปรักกะกุล และคณะ (2561) ที่ทำการศึกษาการคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือแฝงบนวัตถุพยานประเภทถุงพลาสติกสีดำแบบบางหรือถุงขยะแบบบางอบด้วยวิธีการรมควันซูเปอร์กลู แล้วนำมาย้อมด้วยโรดามีน 6จี เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ โดยพบว่า ระยะเวลาประทับรอยลายนิ้วมือผ่านไปแล้ว 28 วัน รอยลายนิ้วมืองดกลายยังมีจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่เพียงพอต่อการยืนยันตัวบุคคลได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chadwick *et al.* (2020) ที่ศึกษาผลกระทบของสารเคมีในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบลายนิ้วมือ โดยวิธีเวทพาวเดอร์, โซยาโนอะคริเลต และโซยาโนอะคริเลตที่ย้อมด้วยโรดามีน 6จี บนเทปต่างๆ ที่มีคุณสมบัติทำให้แสงทะลุผ่านได้ หลังจากการย้อมด้วยโรดามีน 6จี เทปมีสีชมพูและมีการเรืองแสงของฟลูออเรสเซนต์มาก และยากต่อการมองเห็นลายนิ้วมือ แต่ทางผู้วิจัยได้ทำการวิจัยที่ต่างออกไปคือ การใช้พื้นผิวไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนที่ทึบแสงทำให้แสงส่องผ่านไม่ได้จึงทำให้การใช้เทคนิคโรดามีน 6จี มีการเรืองแสงของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ชัดเจน

ในขณะทำงานวิจัยของ Illston-Baggs *et al.* (2021) ได้นำเสนอการศึกษาการคงอยู่ของลายนิ้วมือแฝงในถุงพลาสติกด้วยการอบโอภาโซยาโนอะคริเลตและย้อมสีด้วยเบสิก เกลโล 40 ซึ่งเป็นสีย้อมประเภทสารเรืองแสงเช่นเดียวกับโรดามีน 6จี โดยการย้อมสารเรืองแสงนี้ทำให้สามารถมองเห็นรอยลายนิ้วมือได้อย่างครบถ้วน

เช่นเดียวกับการทดลองของ Downham *et al.* (2018) ที่ได้ทำการทดลองบนธนบัตรโพลีเมอร์ 10 ปอนด์ พบว่า หลังจากการทดลองการใช้สารเรืองแสงสามารถลดผลกระทบจากการรบกวนของพื้นหลังธนบัตร ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ลวดลายและปรับปรุงความคมชัดของรอยนิ้วมือที่เห็นได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของผู้วิจัยที่พบว่าการใช้สารเรืองแสงคือ เทคนิคโรดามีน 6จี และเทคนิคเบสิก เกลโล 40 ก็สามารถลดผลกระทบจากรอยของลายไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนได้เช่นกัน รวมถึงสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐชา สิงหามารศรี (2563) ที่ศึกษาวิธีการหารอยลายนิ้วมือแฝงบนฟิล์มโทรศัพท์มือถือ

ที่จมอยู่ในแหล่งน้ำต่างๆ และนำไปแช่ทิ้งไว้ในน้ำเป็นระยะเวลา 14 ,10 ,7 ,5 ,3 ,1, 21 และ 28 วัน จากนั้นนำมาตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีผงฝุ่นดำ, ไซยาโนอะคริเลต, สารอนุภาคขนาดเล็ก และโรดามีน 6จี พบว่า แม้เวลาจะผ่านไปนานถึง 28 วัน ก็ยังสามารถมองเห็นรอยลายนิ้วมือได้ เนื่องจากพื้นผิวของเมลามีนเป็นพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุนจึงไม่มีการดูดซับกรดอะมิโนและไขมันซึ่งเป็นส่วนประกอบของรอยลายนิ้วมือ ซึ่งทำให้การคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือนั้นสามารถคงอยู่ได้นาน เช่นเดียวกับระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ให้เป็นระยะเวลาที่นานที่สุด ซึ่งเมื่อทดลองแล้วพบว่า เทคนิค โรดามีน 6จี และเทคนิคเบสิก เบลโล 40 เป็นสองเทคนิคที่สามารถมองเห็นรอยลายนิ้วมือได้อย่างชัดเจน โดยเทคนิคโรดามีน 6จี เป็นเทคนิคที่สามารถตรวจพบจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้อย่างมีคุณภาพที่สุด

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคต่างๆ ที่เหมาะสมและระยะเวลาการคงอยู่บนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

เทคนิคในการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงที่เหมาะสมพบว่า อันดับแรก คือ เทคนิคโรดามีน 6จี รองลงมา คือ เทคนิคเบสิก เบลโล 40 เทคนิคบัตผงฝุ่นแม่เหล็ก และเทคนิคบัตผงฝุ่นสีเหลือง ตามลำดับ

2. สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงด้วยเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงกับระยะเวลาบนไม้อัดเคลือบผิว เมลามีน

เทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนแตกต่างกัน ระยะเวลาการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันมีระดับคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีนไม่แตกต่างกัน และเทคนิคการตรวจเก็บรอยลายนิ้วมือแฝงต่างกันและระยะเวลาต่างกันมีปฏิสัมพันธ์ร่วมที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับไม้ชนิดอื่นที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ นอกเหนือจากไม้อัดเคลือบผิวเมลามีน เช่น ไม้ลามิเนตและไม้ปาติเกิล เป็นต้น

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยเทคนิคที่หลากหลายมากขึ้น เช่น เทคนิคลูมิไซยาโน หรือเทคนิคพอลิไซยาโน เป็นต้น เพื่อให้ได้รอยลายนิ้วมือที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

3. ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองโดยใช้อาสาสมัครเพียง 1 คน ซึ่งรอยลายนิ้วมือของแต่ละคนอาจแตกต่างกันและอาจเหมาะสมกับเทคนิคการตรวจเก็บที่อาจแตกต่างกันจึงควรทำการทดลองโดยใช้อาสาสมัครเพิ่มขึ้นเพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมต่อไป

4. ควรเลือกศึกษาจากผงฝุ่นสีอื่นๆ อีกทั้งอาจเลือกใช้ผงฝุ่นอะลูมิเนียมแทนการใช้ผงฝุ่นที่ผลิตจากคาร์บอน

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณพันตำรวจโทศพร ทับทิม นักวิทยาศาสตร์ (สบ3) พิสูจน์หลักฐานจังหวัดนนทบุรี และ พันตำรวจโทหญิงศศิรัตน์ สุทธิพรชัย นักวิทยาศาสตร์ (สบ3) กลุ่มงานตรวจลายนิ้วมือแฝง ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 1 ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ในเรื่อง รอยลายนิ้วมือแฝง และการใช้งานระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบหาจุดลักษณะสำคัญพิเศษ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรรณิการ์ เอื้อทยา, กมลทิพย์ ขัตติยะวงศ์, และพิเชษฐ อนุรักษ์ อุดม. (2558). การพัฒนาการหาลายนิ้วมือแฝงด้วยวัสดุผสมซิงค์ออกไซด์/พีวี. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12: ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน* (น. 517-523). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐชา สิงหามารศรี. (2563). *การตรวจพิสูจน์หารอยลายนิ้วมือแฝงบนฟิล์มโทรศัพท์มือถือที่จมอยู่ในแหล่งน้ำโดยใช้ผงฝุ่นดำ, Cyanoacrylate, Small particle reagent และ Rhodamine6G* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ดารณี เลยะกุล, นิช วงศ์สงจำ, และณรงค์ กุลนิเทศ. (2563). การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่ระยะเวลาต่างกัน โดยวิธีบัตผงฝุ่นดำ. *วารสารวิชาการอาชีวศึกษาและนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ*, 6(1), 77-90.
- บริษัท เมลามีน อาร์ท จำกัด. (2567, 30 มีนาคม). *ไม้อัดเคลือบเมลามีน คืออะไร? Melamine Art*. <https://www.melamineart.com/news-details/19>
- ปิ่นอนงค์ ตริเทพชาญชัย. (2558). *การตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนผิวหนังมนุษย์* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่]. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- วัลลภ เสมาทอง และศุภชัย ศุภลักษณ์นารี. (2555). การตรวจรอยลายนิ้วมือแฝงจากคราบเลือดบนกระดาษชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคอินฟราเรด [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- โสภา คชนุด. (2560). การตรวจหาลายนิ้วมือบนก้อนหิน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เอกจิตรา มีไชยธร. (2551). การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษด้วยอินฟราเรด [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เอกชัย ปรักกมะกุล, สาริสา ปิ่นคำ, และณรงค์ กลุณีเทศ. (2561). การศึกษาการคงอยู่ของรอยลายนิ้วมือบนถุงพลาสติกดำแบบบางโดยการอบด้วยไอน้ำแล้วย้อมด้วยโรดามีน-6จี. ใน การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ "Graduate School Conference 2018" (น. 696-701). มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- BVDA International B.V. (2023, February 10). *Cyanoacrylate staining solutions*. BVDA. <https://www.bvda.com/en/cyano-staining-solution>
- Chadwick, S., Lo, M., Brack, F., Bunford, J., Hales, S., & Roux, C. (2020). Investigation into the effect of fingerprint detection chemicals on the analysis and comparison of pressure-sensitive tapes. *Forensic Science International*, 315, 110454. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110454>
- Downham, R. P., Brewer, E. R., King, R. S. P., & Sears, V. G. (2018). Sequential processing strategies for fingerprint visualization on uncirculated £10 (Bank of England) polymer banknotes. *Forensic Science International*, 288, 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.04.018>
- Illston-Baggs, G., Deacon, P., Ivanova, J., Nichols-Drew, L., & Farrugia, K. J. (2021). A pseudo-operational trial: An investigation into the use of longwave reflected UV imaging of cyanoacrylate developed fingerprints. *Forensic Science International*, 325, 110871. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110871>
- Stewart, V., Deacon, P., & Farrugia, K. J. (2016). A review of one-step fluorescent cyanoacrylate techniques. *Fingerprint Whorld*, 41(162), 6-29.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt.** ตัวหนา

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ให้ใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวปกติ

3.3 หัวข้อหลักให้ใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวหนา

3.4 หัวข้อรองให้ใช้อักษรขนาด **14 pt.** ตัวหนา

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

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ให้ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

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

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

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

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

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

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

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

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

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

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

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุงานการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง 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 ฐานะวุฒ. (2547). หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่. ปิตีศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

มานะ สินฐานนท์. (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 ตันติสุขเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษา
โดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (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). เติลนิวส์ว่าไรต์: 'สื่อพิพิธภัณฑ' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต.
เติลนิวส์, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี. http://drive.google.com/file/d/1HiTWiRh1Er73hVYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Instruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

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

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Aim and Scope:

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

Ownership

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

Advisors

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

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

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

Editorial Board

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

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

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Janloy
Jirarat Puseerit

Six issues per year

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

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 44 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2568

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

