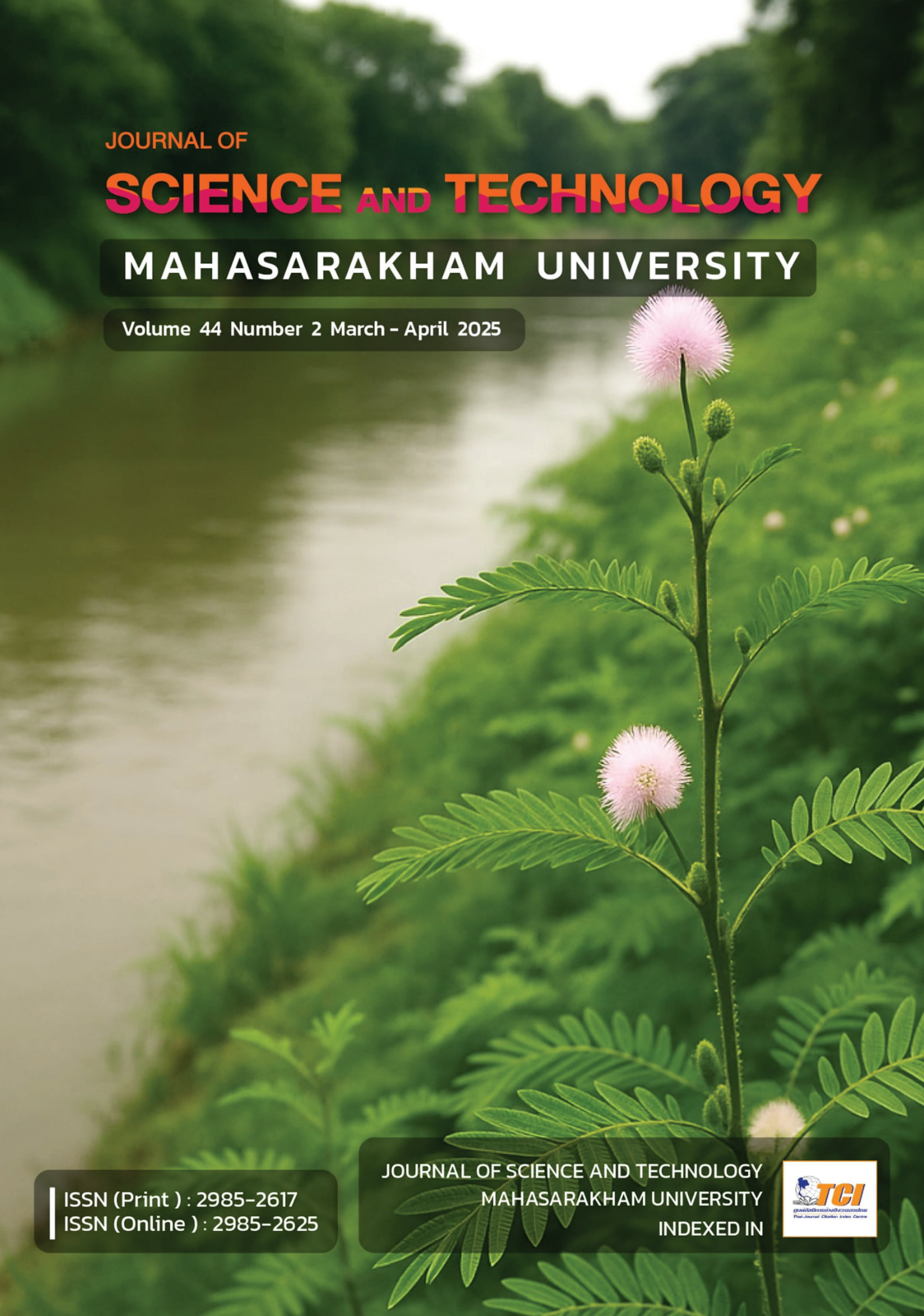


JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 44 Number 2 March - April 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) ในสาขาวิชาต่าง ๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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

ที่ปรึกษา
อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ใบไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

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

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

เลขานุการ
ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ
พักตร์วิไล จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสีฤทธิ์

กำหนดเผยแพร่
ปีละ 6 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์
ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม-สิงหาคม
ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

“**AI จะไม่ได้มาแทนที่นักวิจัย แต่คนที่ใช้ AI อย่างเข้าใจจะมาแทนที่คนที่ไม่ปรับตัว**” — *Thomas Friedman*

ในช่วงห้าปีที่ผ่านมา โลกได้เห็นการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดของระบบปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (LLM: Large Language Model) เช่น ChatGPT, Gemini, Claude, Deepseek, Qwen, Grok และอีกมากมาย เครื่องมือเหล่านี้กลายเป็นพลังขับเคลื่อนที่เปลี่ยนวิธีที่มนุษย์สื่อสาร ทำงาน และสร้างองค์ความรู้ทางวิชาการอย่างลึกซึ้ง

ในวงการวิจัย AI ได้มีบทบาทสำคัญทั้งช่วยร่างเอกสาร วิเคราะห์ข้อมูล และเสนอแนวคิดใหม่ ขณะเดียวกันก็จุดประกายคำถามด้านจริยธรรมและความรับผิดชอบ โดยเฉพาะเมื่อระบบ AI พบว่าบางครั้งพลาด “สร้าง” ข้อมูลเท็จที่ดูสมจริง ที่เรียกว่า AI Hallucination (หรืออาการหลอนยาบ้าของ AI) ซึ่งทำให้ระบบสร้างคำตอบ ที่ดูน่าเชื่อถือ แต่ดันผิดพลาดในสาระ หากไม่ตรวจสอบอย่างรอบคอบ อาจบั่นทอนคุณภาพของงานวิจัยได้

การเตรียมต้นฉบับเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในยุคนี้ จึงต้องมาพร้อมความระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยเฉพาะเมื่อใช้ AI เป็นเครื่องมือ กองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจสอบเอง ก็ต้องให้ความสำคัญกับความถูกต้อง ความโปร่งใส และการแสดงที่มาของข้อมูล เพื่อรักษามาตรฐานทางวิชาการของวารสาร

ในฉบับนี้ เรามีใจนำเสนอผลงาน อาทิ งานวิจัยด้านการใช้ Machine Learning เพื่อวิเคราะห์และคาดการณ์จำนวนนักศึกษาที่ออกจากระบบ ผลงานอื่นในฉบับนี้ยังครอบคลุมสาขาหลากหลาย ตั้งแต่ การพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตร เช่น ข้าวอบกรอบผสมแมคคาเดเมียและผงจิ้งหรีดพร้อมชง, ชีววิทยาการเกษตร เช่น การควบคุมเชื้อราในเห็ดและการพัฒนา embryogenesis ของเท้ายายม่อม, เคมีของสารสกัดสมุนไพร, ไปจนถึง วิศวกรรมศาสตร์ และ เทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น การออกแบบแอปพลิเคชันเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์พฤติกรรมการศึกษาด้วยข้อมูลจริง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ยังคงมุ่งมั่นรักษามาตรฐานวิชาการ และพร้อมเปิดรับความเปลี่ยนแปลงที่มาพร้อมเทคโนโลยีใหม่อย่างมีวิจารณญาณ ท้ายที่สุด กองบรรณาธิการขอขอบคุณนักวิจัย ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้อ่านทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนองค์ความรู้และคุณภาพของวารสารให้ก้าวไปข้างหน้าอย่างมั่นคง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
ผู้ช่วยบรรณาธิการ

สารบัญ

Agricultural Science

การจำแนกเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียนในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย โดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพันธุศาสตร์โมเลกุล 105
Identification of fungal pathogens causing root and stem rot of durian in the lower Northern Thailand using morphological and molecular characteristics
วันวิสาข์ พิระภาค, ตรีภคมลล์ สิทธวีราวุธ, กมลสร ลิ้มสมมุติ และ ครรชิต พิระภาค
Wanwisa Pirapak, Treepakkamon Sitthaweerawut, Kamonsorn Limsommut and Kunchit Pirapak

ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแจ่วบองจิ้งหรีดผง 115
Effects of hot air drying on the physicochemical properties of fermented fish dip (Jaew Bong) with added cricket powder
จิราภรณ์ บุราคร, ปรานต์ ปิ่นทอง, ทรงพร ไกรสิทธิ์, ณัฐชา ศิริวาริน และ มนทกานติ์ เอี่ยมแก้ว
Jiraporn Burakorn, Pran Pinthong, Songporn Kraisit, Nattacha Siriwarin and Montakan Aimkaew

ผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยว 123
Effects of freeze-drying on qualities and acceptance of kao tom mud snack
อัณนภา สุขลิ้ม
Annapha Suklim

Biological Science

แคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานของปลาไหลนา (*Monopterus* albus) ด้วยการย้อมแถบสีโครโมโซมแบบธรรมดาและแบบนอร์ 137
Standardized karyotype and idiogram of swamp eel (*Monopterus* albus) by conventional staining and Ag-NOR banding techniques
นันทิญา มณีโชติ, วัจนารัตน์ ควรดี, ชวนพิศ จารัตน์, ศรัณย์ จำรัสธนสาร, สราวุธ แก้วศรี, กฤษณ์ ปิ่นทอง และ นิชาภา เฉตระการ
Nuntiya Maneechot, Watjanarat Kuandee, Chuanpit Jarat, Sarun Jumrasthanasan, Sarawut Kaewsri, Krit Pinthong and Nichapa Chetrakan

ผลของสารสกัดหยาบจากเปลือกผลมังคุดต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ในกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกผลมังคุด 146
Crude mangosteen peel extracts inhibit *Staphylococcus aureus* in durian peel-based paper
พรลภัส บุญวิชัย, ณัฏฐกิตติ์ ศิริกาญจนโรจน์ และ อรวรรณ ปิยะบุญ
Pornlapas Boonwichai, Nattakit Sirikanjanaroat and Orawan Piyaboon

Engineering

การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างเพื่อการส่งออก ไปยังแขวงอุดมไซ สปป.ลาว 153
Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for selecting an alternative route for transporting construction materials to Oudomxay Province, Lao PDR
นิวัฒน์ชัย ใจคำ, หฤทัยรัตน์ จันต๊ะคาด, ชลิดา อุดมรักษาสกุล และ ชลากร อุดมรักษาสกุล
Niwatchai Jaikham, Harutairat Jantakard, Chalida Udomraksasakul and Chalakorn Udomraksasakul

อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ในการสังเคราะห์ไบโอเซรามิกเตตระแคลเซียมฟอสเฟต 164
Influence of calcium carbonate and calcium oxide on the synthesis of tetracalcium phosphate bioceramic
ชนรรทน์ กองแก้ว, ไกรสร หาริแสง และ ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล
Chanut Kongkaew, Kaisorn Harisaeng and Teerawat Laonapakul

Environmental Science

การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ (กากโหระพา) ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม 172
Production of charcoal briquettes from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue in the flavors industry
น้ำอ้อย ปัญญา และ นฎาภัสส์ คุ้มกลาง
Namooy Panya and Nadaphast Koomklang

Physical Science

การกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก 181
Reed dye removal using the Fenton oxidation process coupled with an ultrasonic-assisted method
รวินิภา ศรีมูล และ สมยศ สันติมาลัย
Rawinipa Srimoon and Somyod Santimalai

การตรวจสอบรอยนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวที่ไม่ดูดซับด้วยผงชายา (*Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh) 189
Latent fingerprint investigation on non-porous surfaces using chaya powder (*Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh)
เกสรา สุขหงษ์, สุภวรรณ พันสิ้ว และ เกษศิรินทร์ เอกสินิทธ์กุล
Kessara Sukhong, Supawan Phansiw and Gedsirin Eksinitkun

การจำแนกเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียนในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย โดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพันธุศาสตร์โมเลกุล

Identification of fungal pathogens causing root and stem rot of durian in the lower Northern Thailand using morphological and molecular characteristics

วันวิสาข์ พิระภาค[1*], ตรีภคมลล์ สิทธวีราวุธ[2], กมลสร ลิ้มสมมุติ[3] และ ครรชิต พิระภาค[4]
Wanwisa Pirapak[1*], Treepakkamon Sitthaweerawut[2], Kamonsorn Limsommut[3] and Kunchit Pirapak[4]

Received: 24 February 2024 ; **Revised**: 22 April 2024 ; **Accepted**: 14 May 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่า จากตัวอย่างดินบริเวณรอบๆ ต้นทุเรียนที่แสดงอาการของโรครากเน่าโคนเน่า ผลทุเรียนและส่วนเปลือกลำต้นที่แสดงอาการของโรคจากพื้นที่ปลูกทุเรียน ในเขตภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดอุตรดิตถ์และสุโขทัย เพื่อจำแนกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าที่ระบาดในพื้นที่ปลูก โดยวิธีทางสัณฐานวิทยาและ อณูชีวโมเลกุล การแยกเชื้อจากดินโดยวิธี Baiting Technique และแยกเชื้อจากเนื้อเยื่อพืชที่เป็นโรค ด้วยวิธี Tissue Transplanting สามารถแยกเชื้อราได้ทั้งหมด 21 ไอโซเลท แบ่งเป็นจากดินจำนวน 16 ไอโซเลท จากเปลือกลำต้นและผลที่เป็นโรคจำนวน 5 ไอโซเลท เมื่อทดสอบความสามารถในการทำให้เกิดโรคบนใบทุเรียนที่ปราศจากโรคและแมลงเข้าทำลาย พบว่ามีเชื้อราจำนวน 9 ไอโซเลท ที่สามารถทำให้เกิดโรคบนใบทุเรียนจากการปลูกเชื้อได้ จากการจำแนกเชื้อสาเหตุโรคโดยวิธีทางสัณฐานวิทยาและอณูโมเลกุล โดยการวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA Region สามารถจำแนกเชื้อราและสิ่งมีชีวิตคล้ายราได้ 4 ชนิด ได้แก่ เชื้อ *Phytophthora palmivora*, เชื้อ *Pythium splendens,* เชื้อรา *Fusarium solani*, และเชื้อรา *Mortierella chlamydospora*

คำสำคัญ: โรครากเน่าโคนเน่า, ทุเรียน, *Phytophthora palmivora, Fusarium solani*, *Mortierella chlamydospora*, *Pythium splendens*

Abstract

This study aimed to isolate and identify the pathogens responsible for root and stem rot disease in durian trees within the rhizosphere zone. Samples were collected from trees exhibiting symptoms of root and stem rot, as well as from affected fruits and stem barks in growing area of the lower northern region, specifically Uttaradit and Sukhothai provinces. Morphological and molecular methods were employed to identify the causative agent of durian root and stem rot. A total of 21 fungal isolates were obtained using baiting and tissue transplanting techniques, comprising 16 isolates from soil and 5 isolates from infected stem barks and fruits. Upon inoculation onto healthy durian leaves, 9 fungal isolates demonstrated pathogenicity. Through morphological characterization and analysis of the ITS-nrDNA Region, four species of the fungi and organisms resembling fungi were identified as *Phytophthora palmivora*, *Pythium splendens*, *Fusarium solani* and *Mortierella chlamydospora*

Keywords: Root and stem rot disease, Durian, *Phytophthora palmivora, Fusarium solani*, *Mortierella chlamydospora*, *Pythium splendens*

---

[1] อาจารย์, หลักสูตรชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000
[2] ผู้ช่วยวิจัย, หลักสูตรชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000
[3] อาจารย์, คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000
[4] อาจารย์, หลักสูตรเทคโนโลยีสำรวจและภูมิสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000
[1] Lecturer, Program of Biology, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang District, Uttaradit Province, 53000
[2] Research assistant, Program of Biology, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang District, Uttaradit Province, 53000
[3] Lecturer, Faculty of Agriculture, Uttaradit Rajabhat University, Mueang District, Uttaradit Province, 53000
[4] Program in Survey Technology and Geo-Informatics, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit Province, 53000
* Corresponding author. E-mail: wanwisa.pir@uru.ac.th

บทนำ

ทุเรียนเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจภาคการเกษตรของประเทศไทย โดยในช่วงปี พ.ศ. 2560-2564 พบว่า ปริมาณและมูลค่าการส่งออกทุเรียนและผลิตภัณฑ์ของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2560 ที่มีปริมาณ 505,425.89 ตัน คิดเป็นมูลค่า 24,942.95 ล้านบาท เพิ่มขึ้นเป็น 925,855.22 ตัน คิดเป็นมูลค่า 119,159.96 ล้านบาท (ส่วนนโยบายและแผนพัฒนาระบบโลจิสติกส์ด้านเกษตร, 2565) ในประเทศไทยมีการปลูกทุเรียนทุกภาค ในเชิงการค้าจะอยู่ภาคตะวันออก ได้แก่ จันทบุรี ระยอง ตราด ภาคใต้ ได้แก่ชุมพร นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี และยะลา ภาคเหนือ ได้แก่ อุตรดิตถ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ ศรีสะเกษ โดยมีพันธุ์ที่นิยมปลูก คือ หมอนทอง กระดุมทอง ชะนี พวกมณี และก้านยาว (สำนักวิจัยและพัฒนาการอารักขาพืช, 2562) ในจังหวัดอุตรดิตถ์และสุโขทัยนั้น สายพันธุ์ทุเรียนที่นิยมปลูกหลักๆ คือพันธุ์หมอนทอง พันธุ์หลงลับแล และพันธุ์หลินลับแล ปัญหาที่สำคัญในการผลิตทุเรียน คือ โรคและแมลง โดยโรคที่พบการระบาดในทุเรียนได้แก่ โรครากเน่าโคนเน่า โรค ราสีชมพู โรคใบติด ใรคใบไหม้หรือใบจุด โรคผลเน่า โรคราดำ โรคราแป้ง โรคใบจุดสนิม โรคแอนแทรคโนส โรคดอกและผลร่วง และโรคฟิวซาเรียม (สำนักงานเกษตรจังหวัดชุมพร, 2564)

โรครากเน่าและโคนเน่าจัดเป็นโรคที่สำคัญของทุเรียน เกิดจากเชื้อราเจริญเข้าไปทำลายทุเรียน หากทำลายที่รากฝอย ปลายยอดและใบแห้ง ถ้าทำลายที่รากใหญ่ ใบหมองซีดแสดงอาการทั้งต้น ใบหลุดร่วงจากกิ่ง เมื่อเชื้อราเจริญเข้าทำลายราก ทำให้รากเน่าเป็นสีน้ำตาล เปลือกรากยุ่ยหลุดลอกง่าย เมื่อเชื้อเข้าทำลายลำต้น เกิดจุดฉ่ำน้ำ มีเมือกไหลเยิ้ม เปลือกลำต้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ใบด้าน เหลืองซีด ใบร่วงและยืนต้นตาย ถ้าเข้าทำลายผล จะทำให้ผลเน่า (ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา, 2562) โรครากเน่าโคนเน่าเป็นปัญหาในการผลิตทุเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบระบาดมากในสภาพแวดล้อมมีฝนตกชุกยาวนาน ความชื้นในอากาศสูง ส่งผลให้เกิดการระบาดรุนแรงและต้นทุเรียนตายเป็นจำนวนมาก (มาลัยพร เชื้อบัณฑิต และคณะ, 2554) โรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียนมีรายงานว่าเกิดจากเชื้อสาเหตุคือ *Phytophthora palmivora* (Chan & Lim, 1986) โดยเชื้อนี้สามารถเข้าทำลายผลทุเรียน ทำให้เกิดโรคผลเน่าหลังการเก็บเกี่ยวได้ด้วย (ปัญจมา กวางติ้ด และสมศิริ แสงโชติ, 2545) Santoso *et al.* (2015) รายงานว่าเชื้อ *Phytophthora* และ *Pythium* เป็นเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่ากับต้นทุเรียนในประเทศอินโดนีเซีย จากการศึกษาลักษณะทางสัญฐานวิทยาและการวิเคราะห์ลำดับเบสในส่วน ITS-nrDNA พบว่าเชื้อราสาเหตุโรคที่แยกได้ มีความใกล้เคียงกับเชื้อรา *Py. cucurbitacearum*, *Py. vexans*, *Pythium* sp. *Py. deliense*, *P. cinnamomic* var. *parvispora* และ *P. palmivora* ในประเทศไทย Suksiri *et al*., 2018 ได้ศึกษาเชื้อสาเหตุของโรครากเน่าโคนเน่าของต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทองในจังหวัดชุมพร โดยใช้ลักษณะทางสัญฐานวิทยาและการวิเคราะห์ลำดับเบสในส่วน ITS-nrDNA เช่นกัน โดยเชื้อราสาเหตุโรคที่พบ คือ *P. palmivora, Py. cucurbitacearum, Py. deliense, Py. splendens, Mortierella chlamydospora, M. capitata* และเชื้อ *Mortierella* sp. ซึ่งเชื้อทั้งหมดสามารถแยกได้จากดินในสวนทุเรียนที่มีการเข้าทำลายของโรครากเน่าโคนเน่า นอกจากนี้เชื้อรา *Py. vexans* มีรายงานว่าเป็นเชื้อสาเหตุโรครากเน่าของทุเรียน ซึ่งพบได้ในดินรอบโคนต้นทุเรียนในเขตจังหวัดศรีสะเกษ (กนกพร ฉัตรไชยศิริ และคณะ, 2561) เชื้อสาเหตุโรคพืชหลายชนิดมีการสะสมอยู่ในดิน ในรายงานของ Moura *et al*., 2022 พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่พบสะสมในดินและสามารถแพร่ระบาดทำให้เกิดโรคได้ในพืช ได้แก่ *Fusarium*, *Macrophomina*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotium*, *Meloidogyne*, *Heterodera* และ *Pratylenchus*

ในการนี้การศึกษาถึงเชื้อสาเหตุของโรครากเน่าโคนเน่าในสวนทุเรียน เขตภาคเหนือตอนล่าง ได้แก่ จังหวัดอุตรดิตถ์ และสุโขทัยจึงถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากเป็นพื้นที่ปลูกที่มีความสำคัญในเชิงการค้า และด้านเศรษฐกิจ (สำนักวิจัยและพัฒนาการอารักขาพืช, 2562) จากรายงานของ Santoso *et al.* (2015) และ Suksiri *et al*. (2018) พบว่าเชื้อ *Phytophthora* spp. และ *Pythium* spp. เป็นเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียนในหลายๆ พื้นที่ แต่ยังไม่มีการศึกษาวิจัยถึงเชื้อสาเหตุโรคที่แท้จริงในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างนี้ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถช่วยเหลือนักวิชาการและเกษตรกรในด้านการควบคุมโรคจากเชื้อสาเหตุที่แท้จริงได้ ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทราบถึงเชื้อสาเหตุโรคที่ทำให้เกิดการระบาดในพื้นที่ปลูกทุเรียน และสะสมในดินในเขตภาคเหนือตอนล่าง และนำไปสู่การป้องกันกำจัดโรคอย่างถูกวิธีต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างและการแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน

เก็บตัวอย่างโรครากเน่าโคนเน่าในสวนทุเรียนของเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง พันธุ์หมอนพระร่วง และพันธุ์ หลงลับแล จำนวน 5 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ที่ 1 ตำบลหัวดง อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ พื้นที่ที่ 2 ตำบลหนองกะท้าว อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก พื้นที่ที่ 3 ตำบลบ้านตึก อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย พื้นที่ที่ 4 ตำบลด่านนาขาม อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ และพื้นที่ที่ 5 ตำบลห้วยไร่ อำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ ในปี พ.ศ. 2565 ช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม เก็บตัวอย่างดินบริเวณใต้ทรงพุ่ม

ของต้นทุเรียนที่แสดงอาการของโรครากเน่าโคนเน่าในบริเวณห่างจากโคนต้นไม่เกิน 30 เซนติเมตร โดยจะเก็บดินที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 10-15 เซนติเมตร ได้ตัวอย่างดินทั้งหมด 12 ตัวอย่าง นำตัวอย่างดินที่เก็บได้ไปทำการแยกเชื้อโดยวิธี Baiting Technique (Suksiri *et al.*, 2018) โดยนำตัวอย่างดินปริมาตร 10 กรัม ใส่ในน้ำกลั่นปลอดเชื้อแล้วปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วใส่ตัวอย่างใบทุเรียนขนาด 5 x 5 ตารางมิลลิเมตร (ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ นาน 5 นาที) แช่ในสารละลายดินนาน 24 ชั่วโมง แล้วนำใบทุเรียนล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อจากนั้นวางบนอาหาร Water Agar (WA) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อมีเส้นใยเชื้อราเจริญจากตัวอย่างใบทุเรียน จึงตัดปลายเส้นใยมาวางบนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA)

ในส่วนของตัวอย่างพืชนั้น ทำการเก็บส่วนเปลือกลำต้นบริเวณลำต้นทุเรียนที่แสดงอาการผิวเปลือกของกิ่งมีลักษณะเปื่อยยุ่ย เป็นปื้นสีน้ำตาลเข้ม เปลือกล่อนง่าย จากต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทอง อายุ 13 ปี จำนวน 1 ตัวอย่าง พันธุ์หมอนพระร่วง อายุ 10 ปี จำนวน 1 ตัวอย่าง และพันธุ์หลงลับแล อายุ 8 ปี จำนวน 2 ตัวอย่าง และจากผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่แสดงอาการของโรคผลเน่า จำนวน 1 ตัวอย่าง ทำการศึกษาอาการของโรคที่พบ การแยกเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าจากส่วนเปลือกลำต้นที่เป็นโรค ด้วยวิธี Tissue Transplanting (วันวิสาข์ พิระภาค และคณะ, 2566) โดยใช้มีดขูดลอกผิวเปลือกทุเรียนภายนอกบริเวณที่เป็นโรคออก จากนั้นใช้มีดผ่าตัดฆ่าเชื้อแล้วตัดเนื้อเยื่อบริเวณที่เชื่อมระหว่างเนื้อเยื่อปกติและบริเวณที่เป็นโรค ขนาดประมาณ 5 x 5 มิลลิเมตร ฆ่าเชื้อด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 5 นาที คีบชิ้นเนื้อเยื่อวางลงบนอาหาร Water Agar (WA) บ่มไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจดูเส้นใยเชื้อราภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ เมื่อพบการเจริญของเส้นใยเชื้อราออกมาจากเนื้อเยื่อ จึงแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี Hyphal Tip Isolation โดยเลี้ยงเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน

กำหนดรหัสของเชื้อราที่แยกได้จากดินและส่วนของต้นและผลทุเรียนที่แสดงอาการของโรค เช่น RT1 หรือ RS1 โดย RT คือ ไอโซเลทของเชื้อราที่แยกจากส่วนเปลือกลำต้นและรากที่แสดงอาการของโรค และ RS คือไอโซเลทของเชื้อราที่แยกจากตัวอย่างดินที่เก็บใต้ต้นที่เกิดโรค และตัวเลข คือ ลำดับไอโซเลทของเชื้อราที่แยกได้ตามลำดับ จากนั้นนำเชื้อราที่แยกได้ไปทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อราสาเหตุโรคต่อไป

2. การทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา

การทดสอบการเกิดโรคบนใบด้วยวิธี detached leaf (Suksiri *et al.*, 2018 ; วันวิสาข์ พิระภาค และคณะ, 2566) บนใบทุเรียนพันธุ์หมอนทอง อายุ 5 ปี โดยการเลี้ยงเชื้อราแต่ละไอโซเลทบนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นใช้ Cork Borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เจาะบริเวณขอบโคโลนีของแต่ละไอโซเลท แล้วย้ายเชื้อราวางลงบนใบทุเรียนระยะโตเต็มที่ ทำการปลูกเชื้อ 4 จุดบนใบ ในแต่ละจุดทำแผลโดยใช้เข็มที่ฆ่าเชื้อแล้วทิ่มลงบนใบ จำนวน 3 แผลต่อจุด โดยจุดที่ 1-3 นำเชื้อราแต่ละไอโซเลทมาวางบนแผล จุดที่ 4 เป็นชุดควบคุมโดยใช้ชิ้นวุ้นเปล่าของอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA (ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ) จากนั้นนำไปบ่มในกล่อง Moist Chamber เป็นเวลา 7 วัน ตรวจสอบการเกิดโรค โดยสังเกตจากจุดแผลสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นที่บริเวณทดสอบ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลที่เกิดขึ้นเพื่อคัดเลือกเชื้อราสาเหตุโรคต่อไป

3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรา

นำเชื้อราที่พบว่ามีความสามารถในการก่อโรคด้วยวิธี detached leaf มาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA บ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง (27-30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 3-5 วัน บันทึกลักษณะโคโลนี ลักษณะเส้นใย การสร้างหรือไม่สร้างโครงสร้างสืบพันธุ์ อาทิเช่น สปอร์ (Spore) คอนิเดีย (Conidia) หรือสปอร์แรงเจียม (Sporangium) บรรยายลักษณะรูปร่างของเส้นใยและโครงสร้างสืบพันธุ์ที่พบภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Santoso *et al.*, 2015 ; Suksiri *et al.*, 2018)

4. การจำแนกชนิดของเชื้อราโดยการวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA

การสกัดดีเอ็นเอประยุกต์วิธี CTAB protocol จากวิธีการของ Doyle and Doyle (1990) โดยนำเส้นใยของเชื้อราสาเหตุโรคไอโซเลทต่าง ๆ ที่เลี้ยงบนอาหาร PDA เป็นระยะเวลา 6 วัน บดด้วยไนโตรเจนเหลว นำเส้นใยที่บดละเอียดประมาณ 1-2 กรัม ใส่ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 2 มิลลิลิตร และเติม β-mercaptothanolol ปริมาตร 2 ไมโครลิตร และบัฟเฟอร์ 2x CTAB ปริมาตร 700 ไมโครลิตร นำหลอดไปต้มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติมสารละลายคลอโรฟอร์ม: แอลกอฮอล์ ไอโซเอมิล (อัตราส่วน 24:1, ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 700 ไมโครลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบ ต่อนาที นาน 3 นาที นำส่วนใสที่ได้ไปเพิ่มปริมาณ ดีเอ็นเอ โดยใช้เทคนิค Polymerase Chain Reaction (PCR) ในบริเวณ ITS-nrDNA โดยใช้ไพเมอร์ (Primer) คือ Forward ITS6 (5'-GAAGGTGAAGTCGTAACAA GG-3') และ Reverse ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTG-ATATGC-3') (Suksiri *et al.*, 2018 ; วันวิสาข์ พิระภาค และคณะ, 2566)

โดยมีปริมาตรทั้งหมด 25 ไมโครลิตร ประกอบด้วย 1x Taq buffer, dNTP 0.2 มิลลิโมลาร์, Primer ชนิดละ 0.2 ไมโครโมลาร์ และ Taq DNA polymerase 5 Unit กำหนดอุณหภูมิช่วง Denaturation ที่ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ช่วง Annealing ที่ 48 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และช่วง Extension ที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 35 รอบ และที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที PCR product ที่ได้นำมาทำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ PCR Purification Test Kit (Macherey-Nagel, Duren, Germany) และส่งไปวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ ที่บริษัท Macrogen ประเทศเกาหลี เปรียบเทียบข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนในบริเวณ ITS-nrDNA ที่ได้กับฐานข้อมูลที่มีรายงานใน GenBank ที่อยู่บนเวปไซต์ของ The National Center for Biotechnology Information (NCBI) โดยใช้โปรแกรม Blastn เพื่อจัดจำแนกชนิดของเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน สร้าง Phylogenetic Tree โดยใช้โปรแกรม MEGA11 โดยวิธี Neighbor-Joining และ Bootstrap จำนวน 1,000 ซ้ำ

ผลการวิจัย

1. ลักษณะอาการที่พบและการแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน

ลำต้นทุเรียนที่พบในการสำรวจแสดงอาการของโรครากเน่าโคนเน่า ดังนี้ ต้นทุเรียนแสดงอาการใบเหลือง ใบอ่อนแสดงอาการเหี่ยว เหลือง แผลมีลักษณะฉ่ำน้ำ เส้นใบมีสีน้ำตาลดำ เชื้อเข้าทำลายลำต้น เกิดจุดฉ่ำน้ำ มีเมือกไหลเยิ้ม ผิวเปลือกของกิ่งมีเปลือกลำต้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงมีลักษณะเปื่อยยุ่ย แผลลุกลามจนรอบโคนต้น (Figure 1A) จะทำให้ทุเรียนใบร่วง ในกรณีของผลมีอาการดังนี้ เกิดจุดแผลขนาดเล็กสีน้ำตาลดำ เมื่อแผลลามจะทำให้เกิดอาการผลเน่า (Figure 1B) ถ้าอาการรุนแรงมากผลจะเน่าร่วงหล่นก่อนกำหนด รากมีอาการเน่าจะลามไปยังรากแขนงและโคนต้น ทำให้ต้นทุเรียนโทรมและยืนต้นตาย

Figure 1 Symptoms of root and stem rot disease on durian trunk (A) and fruit rot (B).

เมื่อทำการแยกเชื้อจากตัวอย่างดินทั้งหมด 12 ตัวอย่าง และตัวอย่างพืชทั้งหมด 5 ตัวอย่าง สามารถแยกเชื้อได้ทั้งหมด 21 ไอโซเลทแบ่งเป็นจากตัวอย่างดิน 16 ไอโซเลท ได้แก่ ไอโซเลท RS1-RS16 และจากตัวอย่างพืช 5 ไอโซเลท ได้แก่ ไอโซเลท RT1-RT5

2. การทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา

จากการปลูกเชื้อทดสอบลงบนใบทุเรียน หลังการปลูกเชื้อเป็นเวลา 7 วัน พบว่ามีจำนวน 9 ไอโซเลทที่สามารถก่อให้เกิดโรคบนใบทุเรียนได้ ได้แก่ ไอโซเลท RS1, RS2, RS9, RS15, RT1, RT2, RT3, RT4 และ RT5 (Table 1) โดยใบทุเรียนที่ถูกปลูกเชื้อ แสดงอาการจุดฉ่ำน้ำในระยะแรก

ต่อมาเนื้อเยื่อเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลถึงดำ มีอาการตายของเนื้อเยื่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผลประมาณ 7-17 มิลลิเมตร (Figure 2) เชื้อราที่แสดงความสามารถในการก่อโรคทั้ง 9 ไอโซเลทนี้ จะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA ต่อไป

Table 1 Fungal isolate names and lesion sizes (mm) after inoculation and incubation for 7 days.

isolate	average lesion sizes (mm ± SD)[1]	isolate	average lesion sizes (mm ± SD)	isolate	average lesion sizes (mm ± SD)
RS1	13.20 ± 1.25	RS8	-	RS15	12.25 ± 2.75
RS2	17.05 ± 2.25	RS9	11.75 ± 2.45	RS16	-
RS3	-	RS10	-	RT1	18.75 ± 2.05
RS4	-	RS11	-	RT2	7.45 ± 1.25
RS5	-	RS12	-	RT3	11.05 ± 2.45
RS6	-	RS13	-	RT4	18.15 ± 2.25
RS7	-	RS14	-	RT5	11.15 ± 2.75

[1](-) indicated no lesion.

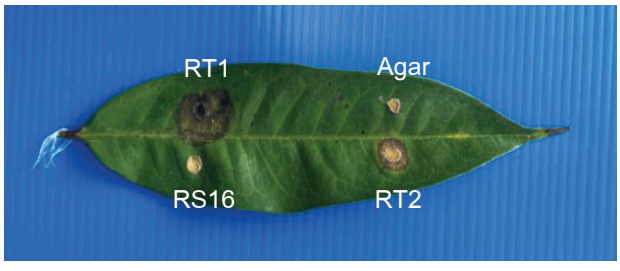


Figure 2 Lesion appearance after 7 days of inoculation of isolates RT1, RS16, RT2 and agar (control).

3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรา

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรา เมื่อเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA เป็นเวลา 7-14 วัน สามารถจำแนกเชื้อออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไอโซเลท RT1 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยา คือ มีเส้นใยเจริญฟูบนผิวอาหาร โคโลนีสีขาว เส้นใยไม่มีผนังกั้น ไม่พบการสร้าง สปอร์ บนอาหารเลี้ยงเชื้อ (Figure 3A)

กลุ่มที่ 2 ไอโซเลท RS1, RS2 และ RS15 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคือ มีลักษณะโคโลนี เส้นใยเจริญฟูบนอาหาร โคโลนีมีสีขาว เมื่อเส้นใยแก่มีสีส้ม เส้นใยแบบมีผนังกั้น บางไอโซเลทพบทั้ง Macroconidia รูปพระจันทร์เสี้ยว ไม่มีสี มี 2-4 เซลล์ และมีการสร้าง Microconidia รูปไข่ กลมรีถึงทรงกระบอก สปอร์ไม่มีสี และมี 1-2 เซลล์ จำแนกได้เป็นเชื้อ *Fusarium* sp. (Figure 3B, 3E and 3F)

กลุ่มที่ 3 ไอโซเลท RS9, RT2 และ RT4 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคือ มีลักษณะโคโลนีสีขาว เส้นใยเจริญฟูบนอาหาร และมีเมือกเยิ้มบนโคโลนี เส้นใยไม่มีผนังกั้น มีการสร้างสปอร์แรงเจียมทรงกลม ภายในบรรจุซูโอสปอร์ (Zoospore) เคลื่อนที่ได้ จำแนกได้เป็นเชื้อ *Pythium* sp. (Figure 3C and 3G)

กลุ่มที่ 4 ไอโซเลท RT3 และ RT5 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคือ มีลักษณะโคโลนี เส้นใยและสปอร์ ดังนี้ เส้นใยเจริญฟูบนอาหาร โคโลนีสีขาว เส้นใยมีผนังกั้น มีสปอร์ทรงกลม สปอร์ไม่มีสีและมีเซลล์เดียว ผนังสปอร์หนาและผิวสปอร์เป็นหนาม จำแนกได้เป็นเชื้อ *Mortierella* sp. (Figure 3D and 3H)

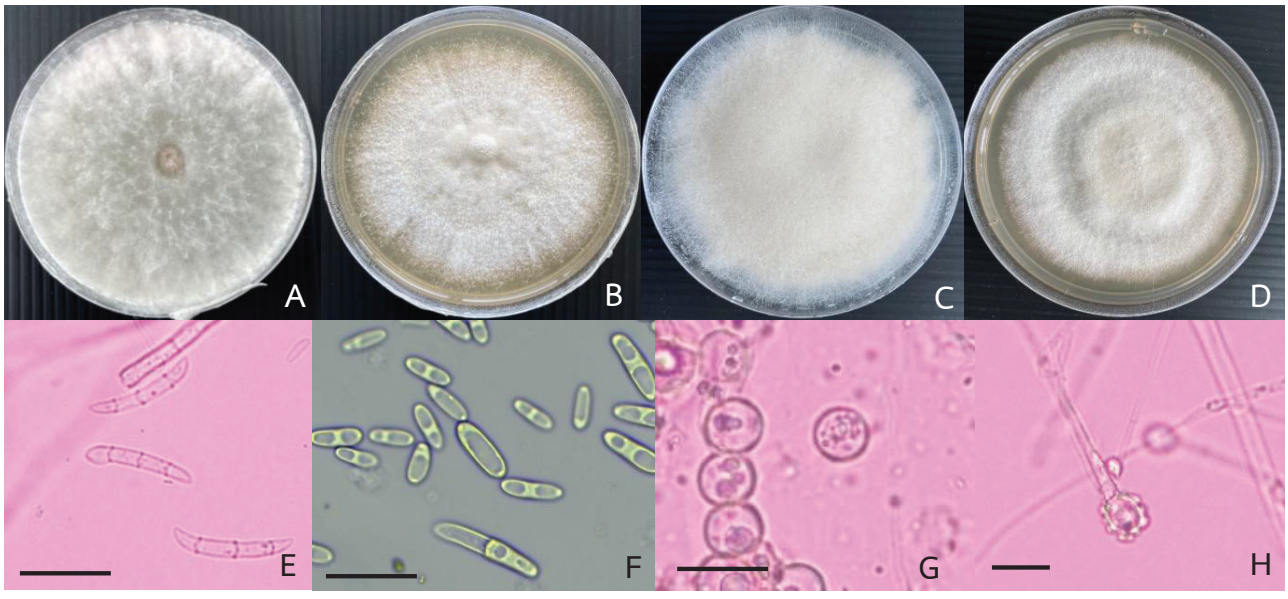


Figure 3 Morphological characteristic of isolate RT1, RS15, RT2 and RT5 colony (A, B, C and D, respectively) after 5 days of inoculation. Macroconidia (E) and microconidia (F) of RT1, Sporangium contains zoospore (G) of RT2 and thick-walled sporangium (H) of RT5 observed under compound microscope. (Scale bar = 10 µm)

4. การจำแนกชนิดของเชื้อราโดยการวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA

ในการวิเคราะห์ลำดับเบสนิวคลีโอไทด์ในบริเวณ ITS-nrDNA region ของเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าในทุเรียนไอโซเลทต่างๆ (Table 2, Figure 4, 5 และ 6) พบว่าไอโซเลท RT1 บ่งชนิดได้เป็นเชื้อรา *Phytophthora palmivora* โดยจาก Phylogenetic tree เชื้อรากลุ่มที่ 1 ไอโซเลท RT1 มีความใกล้เคียงกับเชื้อ *P. palmivora* OP765505 มีเปอร์เซ็นต์ความเหมือน (% identity) เท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ (Figure 4) เชื้อรากลุ่มที่ 2 ไอโซเลท RS1, RS2 และ RS15 สามารถบ่งชนิดได้เป็นเชื้อรา *Fusarium solani* โดยมีความใกล้เคียงกับเชื้อรา *F. solani* MN637863 ที่ 99 เปอร์เซ็นต์ (Figure 5) เชื้อรากลุ่มที่ 3 ไอโซเลท RS9, RT2 และ RT4 สามารถบ่งชนิดได้เป็นเชื้อรา *Pythium splendens* โดยมีความใกล้เคียงกับ *Py. splendens* AB780581 ที่ 98 เปอร์เซ็นต์ (Figure 4) ส่วนเชื้อรากลุ่มที่ 4 ไอโซเลท RT3 และ RT5 สามารถบ่งชนิดได้เป็นเชื้อรา *Mortierella chlamydospore* โดยมีความใกล้เคียงกับเชื้อรา *M. chlamydospore* OL620104 ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (Figure 6)

อภิปรายผล

โรคในทุเรียนเป็นปัญหาใหญ่ที่ทำให้ผลผลิตของทุเรียนลดลง บางชนิดทำให้ผลผลิตเสียหายจนไม่สามารถขายหรือส่งออกไปยังต่างประเทศได้ (สำนักวิจัยและพัฒนาการอารักขาพืช, 2562) โรครากเน่าและโคนเน่าจัดเป็นโรคที่สำคัญ ทำให้ทุเรียนแสดงอาการในหลายๆ ส่วนของต้น ได้แก่ ปลายยอดแห้ง ใบหลุดร่วงจากกิ่ง รากเน่าเป็นสีน้ำตาล เปลือกรากยุ่ยหลุดลอกง่าย เกิดจุดฉ่ำน้ำ มีเมือกไหลเยิ้มที่ลำต้น นอกจากนี้ยังแสดงอาการผลเน่าด้วย (ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา, 2562) ในการศึกษานี้ได้ทำการแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าจากดิน และส่วนของพืชที่ถูกเชื้อเข้าทำลายจากสวนทุเรียนจังหวัดอุตรดิตถ์ จังหวัดสุโขทัย จังหวัดพิษณุโลก และจังหวัดแพร่ โดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ลักษณะโคโลนี เส้นใยและการสร้างโครงสร้างสืบพันธุ์ และอณูชีวโมเลกุล ได้แก่การวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA พบเชื้อสาเหตุโรค และเชื้อราในดิน จำนวน 4 ชนิด ได้แก่เชื้อ *Phytophthora palmivora* เชื้อ *Pythium splendens* เชื้อรา *Fusarium solani* และเชื้อรา *Mortierella chlamydospora*

Table 2 DNA sequence analysis of the ITS-nrDNA region of the fungus isolates from durian and soil from the lower northern region of Thailand.

isolate	specimen	place	accession number	identification		
				Molecular	accession number	% identity
RT1	trunk bark	Nakhon Thai District, Phitsanulok Province	PP267701	*Phytophthora palmivora*	OP765505	99
RS1	soil	Nakhon Thai District, Phitsanulok Province	PP267711	*Fusarium solani*	MN637863	99
RS2	soil	Mueang District, Uttaradit Province	PP267702	*Fusarium solani*	MN637863	99
RS15	soil	Mueang District, Uttaradit Province	PP267705	*Fusarium solani*	MN637863	99
RS9	soil	Den Chai District, Phrae Province	PP267710	*Pythium splendens*	AB780581	98
RT2	fruit	Laplae District, Uttaradit Province	PP267712	*Pythium splendens*	AB780581	98
RT4	trunk bark	Si Satchanalai District Sukhothai Province	PP267713	*Pythium splendens*	AB780581	98
RT3	trunk bark	Den Chai District, Phrae Province	PP267714	*Mortierella chlamydospora*	OL620104	100
RT5	trunk bark	Laplae District, Uttaradit Province	PP267715	*Mortierella chlamydospora*	OL620104	100

โดยเชื้อ *Fusarium solani* และ *Pythium splendens* สามารถแยกเชื้อได้จากดินในสวนที่มีการระบาดของโรค ชี้ให้เห็นว่าเชื้อทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถอาศัยอยู่ในดินได้ นอกจากนั้น *Phytophthora palmivora* และ *Mortierella chlamydospora* ก็สามารถอาศัยอยู่ในดินได้เช่นกัน โดยในการศึกษาของ Santoso *et al.* (2015) รายงานว่าเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าที่พบในประเทศอินโดนีเซีย ได้แก่ เชื้อในกลุ่ม *Phytophthora* และ *Pythium* นั้นสามารถอาศัยอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน Sodikov *et al.* (2022) รายงานว่าเชื้อสาเหตุโรคในต้นทานตะวัน คือ เชื้อราในสกุล *Fusarium*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Verticillium dahlia*, *Rhizoctonia solani* และเชื้อ *Pythium* spp. สามารถแพร่ระบาดและสะสมในดิน และเข้าทำลายพืชปลูกทางระบบรากก่อนส่วนอื่นๆ ในงานวิจัยของ Ozimek and Hanaka (2021) พบว่า เชื้อ *Mortierella* sp. พบโดยทั่วไปในดินทางการเกษตร และสามารถช่วยกระตุ้นการเจริญของพืชได้

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อที่แยกได้ และมีความสามารถในการก่อโรคนั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในด้านลักษณะของโคโลนี การมีหรือไม่มีผนังกั้นของเส้นใย และการสร้างสปอร์ พบว่าลักษณะโคโลนีของ *Phytophthora, Pythium* และ *Mortierella* มีความคล้ายคลึงกัน

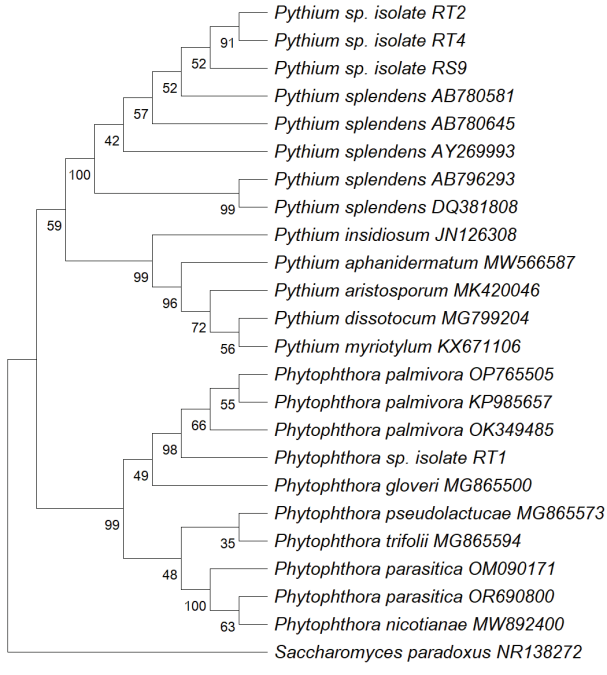


Figure 4 Phylogenetic tree obtained from the analyses of ITS-nrDNA sequence data, representing the identification of *Pythium* sp. Isolate RT2, RT4 and RS9 as *Pythium splendens* and *Phytophthora* sp. isolate RT1 as *Phytophthora palmivora*, the numbers above the nodes are the percentage of the trees from bootstrap analysis.

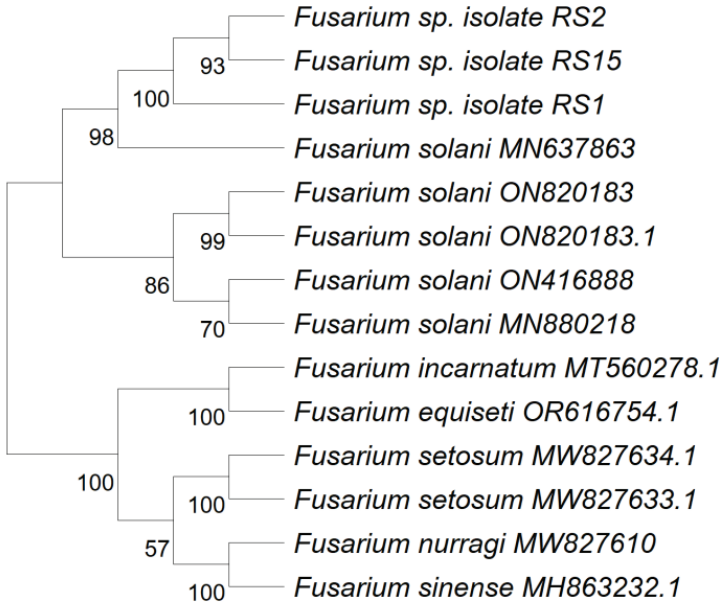


Figure 5 Neighbor-Joining phylogenetic tree obtained from the analyses of ITS-nrDNA sequence data, representing the identification of *Fusarium* sp. isolate RS1, RS2 and RS15 as *Fusarium solani*, the numbers above the nodes are the percentage of the trees from bootstrap analysis.

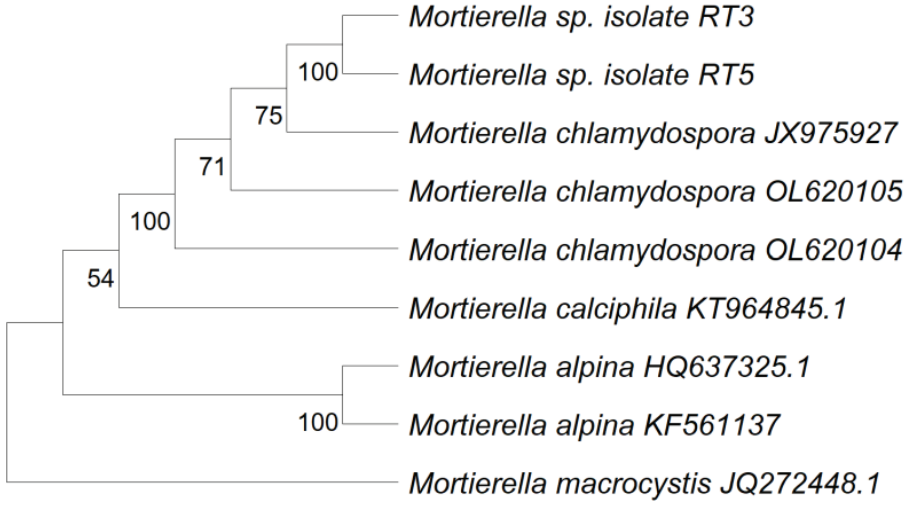


Figure 6 Neighbor-Joining phylogenetic tree obtained from the analyses of ITS-nrDNA sequence data, representing the identification of *Mortierella* sp. isolate RT3 and RT5 as *Mortierella chlamydospora*, the numbers above the nodes are the percentage of the trees from bootstrap analysis.

ในบางไอโซเลทไม่พบการสร้างสปอร์บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ชี้ให้เห็นว่าการใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาอย่างเดียวไม่เพียงพอในการจัดจำแนกเชื้อรา เหมือนกับในรายงานของ Suksiri *et al.* (2018) พบว่า ลักษณะโคโลนีของเชื้อราสกุล *Mortierella* คล้ายกับของเชื้อราสกุล *Pythium* และมีการสร้าง Zygospore คล้ายกับ Oospore ของเชื้อ *Pythium* ส่วนเชื้อ *Pythium* sp.นั้นมีการสร้าง sporangium ผนังบาง ไม่มี papilla ภายในมี Zoospore คล้ายกับเชื้อ *Phytophthora* บางสายพันธุ์ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่พบการสร้าง Sporangium ใน *P. palmivora* ไอโซเลท RT1 อาจต้องใช้วิธีการอื่นในการกระตุ้นให้เชื้อมีการสร้างสปอร์ ในเชื้อราไอโซเลทอื่นๆ สามารถที่สร้างสปอร์ และสามารถบ่งชนิดในระดับสกุลได้ ส่วนการจำแนกชนิดต้องใช้การวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA มาช่วยในการจำแนกเชื้อ เนื่องจากทำได้อย่างรวดเร็วและเป็นวิธีการที่น่าเชื่อถือ

ในงานวิจัยนี้พบว่าเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน และเชื้อราที่พบในดินในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย สามารถจำแนกได้ 4 ชนิดได้แก่ เชื้อ *P. palmivora*, *F. solani*, *Py. splendens* และ *M. chlamydospora* โดยเชื้อ *Py. splendens* สามารถพบได้ทั้งในดิน บนผล และเปลือกลำต้นที่แสดงอาการของโรค ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าเชื้อที่อยู่ในดินสามารถเข้าทำลายราก และลามไปยังส่วนต่าง ๆ ของต้นทุเรียนได้ สอดคล้องกับที่เคยมีรายงานในพื้นที่ปลูกทุเรียนในจังหวัดชุมพร โดย Suksiri *et al.* (2018) ได้รายงานว่าเชื้อที่แยกได้จากดินในสวนทุเรียน ได้แก่ *P. palmivora, Py. cucurbitacearum, Py. deliense, Py. splendens, M. chlamydospora, M. capitata* และ *Mortierella* sp. โดยเชื้อ *P. Palmivora* และ *P. cucurbitacearum* ทำให้เกิดโรคบนใบทุเรียนที่ใช้ทดสอบรุนแรงที่สุด นอกจากนี้ *Py. splendens* ทำให้เกิดแผลบนใบของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ซึ่งใช้ในการทดสอบความสามารถในการเกิดโรค ส่วน *P. delicense* และ เชื้อราในสกุล *Mortierella* ไม่เกี่ยวข้องกับโรคใบเน่าของทุเรียน ในงานวิจัยของ Chantarasiri and Boontanom (2021) พบว่าเชื้อรา *F. solani* และ *Lasiodiplodia pseudotheobromae* เป็นเชื้อสาเหตุโรคเข้าทำลายลำต้นของทุเรียนในภาคตะวันออกของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดระยองและจันทบุรี นอกจากนี้เชื้อ *F. solani* ยังเป็นเชื้อสาเหตุโรคกิ่งแห้งของทุเรียนด้วย (พัชรี บุญเรืองรอด และคณะ, 2564)

จากการทดลองทำให้ทราบว่าเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน และเชื้อราที่พบในดินในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย สามารถจำแนกได้ 4 ชนิดได้แก่ เชื้อ *P. palmivora*, *F. solani*, *Py. splendens* และ *M. chlamydospora* ซึ่งพบว่ามี 9 ไอโซเลท (จาก 21 ไอโซเลท) ที่สามารถทำให้เกิดอาการของโรคบนใบทุเรียนได้เมื่อปลูกเชื้อ จัดเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญและจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมในการพิสูจน์โรคและการควบคุมโรคในพื้นที่เพาะปลูกทุเรียนต่อไป

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่า จากตัวอย่างดิน และส่วนของทุเรียนที่แสดงอาการของโรค ในเขตภาคเหนือตอนล่าง สามารถแยกเชื้อราจากดินจำนวน 16 ไอโซเลท จากส่วนของทุเรียนที่เป็นโรคจำนวน 5 ไอโซเลท มีจำนวน 9 ไอโซเลทที่สามารถทำให้เกิดโรคบนใบทุเรียนจากการปลูกเชื้อได้ ในการจำแนกเชื้อโดยวิธีทางสัณฐานวิทยาและอณูชีวโมเลกุลโดยการวิเคราะห์ลำดับเบสดีเอ็นเอในส่วน ITS-nrDNA Region สามารถจำแนกเชื้อราและสิ่งมีชีวิตคล้ายราได้ 4 ชนิด ได้แก่ เชื้อ *Phytophthora palmivora*, เชื้อ *Pythium splendens,* เชื้อรา *Fusarium solani*, และเชื้อรา *Mortierella chlamydospore* จากการวิจัยนี้เป็นแนวทางให้เกษตรกรหาวิธีมาควบคุมโรคจากเชื้อข้างต้นได้อย่างถูกต้องต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ภายใต้แผนงบประมาณกองทุนของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปี 2565 ขอขอบคุณหลักสูตรชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กนกพร ฉัตรไชยศิริ, รัติยา พงศ์พิสุทธา, ชัยณรงค์ รัตนกรีฑากุล และ สัณฐิติ บินคาเดอร์. (2561). เชื้อรา *Pythium* sp. สาเหตุโรครากเน่าของทุเรียน และประสิทธิภาพของสารเคมีในการควบคุม. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, *49*(4) (พิเศษ), 171-174.

ปัญจมา กวางติ้ด และสมศิริ แสงโชติ. (2545). การจัดการโรคผลเน่าของทุเรียน (*Durio zibethinus* Murr.) ที่เกิดจากเชื้อรา *Phytophthora palmivora* (Butl.) Butl. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, *33*(6) (พิเศษ), 45-48.

พัชรี บุญเรืองรอด, รัติยา พงศ์พิสุทธา, และ ชัยณรงค์ รัตนกรีฑากุล. (2564). ปัจจัยทางสรีรวิทยาต่อการเจริญของ *Fusarium solani* สาเหตุโรคกิ่งแห้งของทุเรียนและสารเคมีในการควบคุม. *แก่นเกษตร*, *49*(6), 1375-1387. https:// doi:10.14456/kaj.2021. 122

มาลัยพร เชื้อบัณฑิต, ศิริพร วรกุลดำรงชัย, อภิรดี กอร์ปไพบูลย์ และ วิชาญ ประเสริฐ. (2554). ศึกษาประสิทธิภาพของสารเคมีและสารอินทรีย์ในการป้องกันกำจัดโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน. *รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็มสิ้นสุดปี 2554 กรมวิชาการเกษตร*.

วันวิสาข์ พิระภาค, พัทธชัย ปิ่นนาค และ ปิลันธนา ฐาปนพงษ์วรกุล. (2566). การคัดแยก จำแนกและศึกษาคุณสมบัติของเชื้อ *Streptomyces* sp. SAURU59 ที่ใช้กำจัดเชื้อราก่อโรครากเน่าโคนเน่าของทุเรียน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, *28*(3), 1981-1998.

ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีการเกษตรด้านอารักขาพืช จังหวัดสงขลา. (2562). *การจัดการโรคและแมลงศัตรูทุเรียน.* สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาเกษตรที่ 5 จังหวัดสงขลา กรมส่งเสริมการเกษตร.

ส่วนนโยบายและแผนพัฒนาระบบโลจิสติกส์ด้านเกษตร. (2565). *โครงการศึกษารูปแบบการขนส่งทุเรียนสดจากประเทศไทยไปสาธารณรัฐประชาชนจีน*. กอลนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.

สำนักงานเกษตรจังหวัดชุมพร. (2564). *คู่มือการผลิตทุเรียนคุณภาพจังหวัดชุมพร*. กรมส่งเสริมการเกษตร.

สำนักวิจัยและพัฒนาการอารักขาพืช. (2562). *เอกสารวิชาการเรื่องโรคทุเรียน*. กรมวิชาการเกษตร.

Chan, L. G., & Lim, T. K. (1986). Comparative in vitro sensitivity of selected chemicals on *Phytophthora palmivora* from cocoa and durian. *Pertanika*, *9*(2), 183-191.

Chantarasiri, A. & Boontanom, P. (2021). *Fusarium solani* and *Lasiodiplodia pseudotheobromae*, *fungal pathogens causing stem rot disease on durian trees* (*Durio zibethinus*) in Eastern Thailand. New Disease Report, 44, e12026. https://doi.org/10.1002/ndr2.12026

Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1990). Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus*, *12*, 13-15.

Moura, A. B., Backhouse, D., de Souza Júnior, I. T., Gomes, C. B. (2022). Soilborne Pathogens. In: Oliveira, T. S. d., Bell, R. W. (eds). *Subsoil Constraints for Crop Production.Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00317-2_9

Ozimek, E. ; Hanaka, A. (2021). *Mortierella* Species as the Plant Growth-Promoting Fungi Present in the Agricultural Soils. *Agriculture*, *11*, 7. https://dx.doi.org/10.3390/ agriculture11010007

Santoso, P. J., Aryantha, I. N. P., Pancoro, A., & Suhandono, S. (2015). Identification of *Pythium* and *Phytophthora* associated with durian (*Durio* sp.) in Indonesia: their molecular and morphological characteristics and distribution. *Asian Journal of Plant pathology*, *9*(2), 59-71.

Sodikov, B., Khakimov, A., Rakhmonov, U., Omonlikov, A., Gulmatov, R., & Utaganov, S. (2022). Soil-borne plant pathogenic fungi biodiversity of sunflower. Sustainable Management of Earth Resources and Biodiversity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-8. https://doi:10.1088/1755-315/1068/1/012018

Suksiri, S., Laipasu, P., Soytong, K., & Poeaim, S. (2018). Isolation and identification of *Phytophthora* sp. and *Pythium* sp. from durian orchard in Chumphon Province, Thailand. *International Journal of Agricultural Technology*, *14*(3), 389-402.

ผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแจ่วบองจิ้งหรีดผง
Effects of hot air drying on the physicochemical properties of fermented fish dip (Jaew Bong) with added cricket powder

จิราภรณ์ บุราคร[1], ปรานต์ ปิ่นทอง[2], ทรงพร ไกรสิทธิ์[3], ณัฐชา ศิริวาริน[3] และ มนทกานต์ เอี่ยมแก้ว[4*]
Jiraporn Burakorn[1], Pran Pinthong[2], Songporn Kraisit[3], Nattacha Siriwarin[3] and Montakan Aimkaew[4*]

Received: 3 January 2024 ; **Revised**: 4 April 2024 ; **Accepted**: 13 May 2024

บทคัดย่อ
แจ่วบองเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบของปลาร้า กระเทียม หอมแดง พริกแห้ง ข่า ตะไคร้ผ่านการผัดผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันจนเกิดกลิ่นหอม ลักษณะทั่วไปเป็นแบบข้นหนืด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของแจ่วบองอบแห้งที่มีส่วนผสมของจิ้งหรีดผง นำแจ่วบองจิ้งหรีดมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) และที่ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด แจ่วบองจิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 240 นาที มีความชื้นร้อยละ 13.79±0.68 a_w เท่ากับ 0.56±0.31 และโปรตีนสูงถึงร้อยละ 26.4 กรัม ผลิตภัณฑ์แจ่วบองจิ้งหรีดผงทั้งสามตัวอย่างมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.51-0.58 ($p\leq0.05$) ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3.63-3.99 ($p\leq0.05$) ค่าเฉลี่ยความสว่าง (L^*) ของแจ่วบองจิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ($p\leq0.05$) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) และค่าความเข้มสี (C^*) ของแจ่วบอง จิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่ามากที่สุด ($p\leq0.05$) แจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปทั้งสามตัวอย่างมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.79-0.80 และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการดูดน้ำคืนสูงที่สุด ($p\leq0.05$) ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน ให้คะแนนความชอบ (9-Point Hedonic Scale) ด้านสี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมแจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ในขณะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้คะแนนความชอบในทุกด้านมากที่สุด ($p\leq0.05$) อุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อนแจ่วบองจิ้งหรีดที่เหมาะสมคือ 70 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: จิ้งหรีด, แจ่วบอง, แจ่วบองผงอบแห้ง, อบแห้งแบบลมร้อน, อัตราการอบแห้ง

Abstract
Fermented fish dip (Jaew Bong) is a food product whose main ingredients are fermented fish, garlic, shallots, dried chilies, galangal and lemongrass. All ingredients are stir-fried and mixed until fragrant with the general characteristics being semi-solid. The objective of this study was to investigate the results of hot air drying on chemical properties, physical properties and sensory qualities of fermented fish dip (Jaew Bong) with added cricket powder. Jaew Bong crickets were dried in a hot air oven at temperatures 60°C, 70°C and 80°C. The drying rates at 60°C and 70°C were not different ($p>0.05$) but 80°C resulted in the highest drying rate. Jaew Bong cricket powder at 70°C for 240 min provided 13.79±0.68% of moisture content, 0.56±0.31 of a_w and 26.4 g of protein. All three samples of Jaew Bong cricket powder products had a_w levels in the range of 0.51 - 0.58 ($p\leq0.05$) and moisture content in the range of 3.63-

[1] นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ, กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ 02-201-7419
[2] นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ, กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ 02-201-7419
[3] นักวิทยาศาสตร์, กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ 02-201-7419
[4*] นักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ, กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ 02-201-7419
[1] Scientist Expert Level, Food Products and Food Contact Materials Division, Department of Science Service
[2] Scientist Senior Professional Level, Food Products and Food Contact Materials Division, Department of Science Service
[3] Scientist, Food Products and Food Contact Materials Division, Department of Science Service
[4*] Scientist Practitioner Level, Food Products and Food Contact Materials Division, Department of Science Service
* Corresponding author. Email: montakan.ak@gmail.com

3.99 ($p \leq 0.05$). The *L** value of dried Jaew Bong cricket powders at 60°C and 70°C were higher than that of dried Jaew Bong cricket at 80°C ($p \leq 0.05$). The *a**, *b** and *C** values of dried Jaew Bong cricket powder at 70°C had the highest ($p \leq 0.05$). All three of rehydrated Jaew Bong cricket products had the range of 0.79-0.80 in a_w and the highest rehydration ratio was presented at 80°C ($p \leq 0.05$). The 50 untrained panelists gave the liking scores (9-Point Hedonic Scale) of color, texture and overall liking of rehydrated Jaew Bong cricket at temperatures of 60°C and 80°C was not statistically different ($p > 0.05$), while at 70°C the liking scores of all attributes were the highest ($p \leq 0.05$). In conclusion, 70°C is appropriate temperature for drying the product.

Keywords: Cricket, Jaew Bong, Fermented fish dip, Dried fermented fish dip powder, Hot air drying, Drying rate

บทนำ

ปัจจุบันการบริโภคแมลงเป็นที่ยอมรับทั้งในประเทศและต่างประเทศ การเติบโตทางการตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากแมลงจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามภาพลักษณ์ของแมลงอาจทำให้ผู้บริโภคบางรายเกิดความรังเกียจอาหารที่มีส่วนประกอบจากแมลง (Sogari *et al.,* 2019) จึงเป็นเรื่องที่วงการอุตสาหกรรมอาหารทั่วประเทศให้ความสนใจในการสร้างการรับรู้และทัศนคติเชิงบวกเกี่ยวกับการบริโภคแมลงที่มุ่งเน้นเรื่องคุณประโยชน์เป็นสิ่งสำคัญ จนทำให้ผู้บริโภคมองข้ามความน่าเกลียดของตัวแมลงไป กระแส (Trend) ของอาหารและเครื่องดื่ม ในปี 2020 จาก Food Ingredients Asia พบว่าโปรตีนจิ้งหรีด เป็นโปรตีนที่ผู้บริโภคให้การยอมรับบริโภคเพื่อใช้ทดแทนโปรตีนเนื้อสัตว์ ซึ่งมีมูลค่าในตลาดปัจจุบันประมาณ 6,725 ล้านบาท โดยพบว่าแป้งจากแมลง 100 กรัมจะให้ปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 50 มากกว่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์อื่นๆ ที่ให้ปริมาณเพียงร้อยละ 30 (ชุตินันท์, 2562)

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 70 (น้ำหนักแห้ง) และยังมีกรดอะมิโนที่สำคัญ อาทิ กรดกลูตามิค ลูซีน วาลีน และฟีนิลอะลานีน เป็นต้น (Yi *et al.,* 2013) อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ เลี้ยงง่ายใช้เวลาไม่นาน ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรการเลี้ยงน้อยกว่าปศุสัตว์ งานวิจัยของ Jino *et al.* (2021) ได้สกัดโปรตีนเข้มข้นด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์จากจิ้งหรีด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ จิ้งหรีดทองแดงลาย จิ้งหรีดทองมาเลย์ และจิ้งโกร่ง พบว่า ปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 17.51-22.20 (น้ำหนักเปียก) และจิ้งโกร่งมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanboonsong *et al.* (2001) พบว่า จิ้งหรีดมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 21.5 ซึ่งมีปริมาณโปรตีนมากกว่าแมลงกินได้ชนิดอื่นๆ ที่มีเพียงร้อยละ 15.3 เช่น หนอนไม้ไผ่ (Yhoung-Aree & Viwatpanich, 2005) ทั้งนี้ ปริมาณโปรตีนหลังการสกัดที่แตกต่างกันมีผลมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์จิ้งหรีด อาหาร และวงจรชีวิตเช่นกัน (Chen *et al.,* 2009) ด้วยปริมาณโปรตีนที่สูงของจิ้งหรีดจึงมีการนำโปรตีนผงจากจิ้งหรีดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการพัฒนาอาหารแปรรูปเสริมโปรตีน เช่น เครื่องดื่มสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์เบเกอรี คุกกี้ ข้าวเกรียบ น้ำพริก เป็นต้น ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนทางเลือก และเสริมคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์อาหาร

แจ่วบอง เป็นผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคนิยมรับประทานอย่างแพร่หลายทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งส่วนประกอบหลักของแจ่วบองได้แก่ ปลาร้า (ปลาร้าผงหรือน้ำปลาร้า) กระเทียม หอมแดง พริกแห้ง ข่า และตะไคร้ ผ่านการผัดผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันจนเกิดกลิ่นหอม (กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, 2558) ในปัจจุบัน กลุ่มเกษตรกรแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำขนาดเล็กและขนาดย่อมทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวนมากผลิตแจ่วบองทั้งแบบสุกและแบบดิบเพื่อจำหน่าย ซึ่งผลิตภัณฑ์แจ่วบองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แจ่วบองพร้อมบริโภคและแจ่วบองพร้อมปรุง ผลิตภัณฑ์แจ่วบองพร้อมปรุง หมายถึง แจ่วบองที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ต้องเติมน้ำร้อนและคนให้เข้ากันก่อนบริโภค ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารแห้งนั้นสามารถเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลานาน สามารถควบคุมและป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรคได้ (Fellows, 2009) อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ แจ่วบองแบบแห้งยังมีวางจำหน่ายไม่มากนักและยังเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารแห้งสามารถยืดระยะเวลาการเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีไม่เกิน 0.66 (Ulloa *et al.,* 2015) และยังมีความสะดวกในการบริโภค Pongdanai and Somsamorn (2020) ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แจ่วบองอบแห้ง 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการอบแห้งแจ่วบอง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีสีที่ดีกว่าและค่า *L** มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อีกทั้งผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสได้รับคะแนนจากผู้บริโภคมากกว่า โดยการควบคุมกระบวนการผลิตโดยการให้ความร้อนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดสี กลิ่น และรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไปของผลิตภัณฑ์แจ่วบองอบแห้งต่อการยอมรับของผู้บริโภค

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของการทำแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแจ่วบองอบแห้งที่มีส่วนผสมของจิ้งหรีดผงเพื่อเสริมคุณค่าอาหารทางโปรตีน รวมทั้งประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและตรงตามความชอบของผู้บริโภคและยังส่งเสริมการตลาดสร้างผลิตภัณฑ์แบบใหม่ๆ ให้แก่ผู้ประกอบการรายย่อยต่อไป

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

หอมแดง กระเทียม ตะไคร้ ข่า พริกขี้หนูป่น ใบมะกรูด น้ำมะขามเปียกจากตลาดคอกม้า เขตราชเทวี กรุงเทพฯ น้ำตาลทรายตรามิตรผล และจิ้งหรีดผงจากร้านจิ้งหรีดเมืองขอน จังหวัดขอนแก่น

2. การผลิตแจ่วบองจิ้งหรีด (ดัดแปลงจาก ณวรา, 2565)

นำหอมแดง กระเทียม มาลอกเปลือกออกแล้วหั่นหอมแดง (60 กรัม) กระเทียม (70 กรัม) ตะไคร้ (120 กรัม) ข่า (60 กรัม) เป็นชิ้นเล็กๆ คั่วหอมแดงและกระเทียมด้วยไฟอ่อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที จนสุกมีกลิ่นหอม นำไปโขลกรวมกับตะไคร้และข่าให้ละเอียด ผสมจิ้งหรีดผง (200 กรัม) โขลกให้เข้ากันใส่พริกขี้หนูแห้งป่น (45 กรัม) ใบมะกรูดซอย (70 กรัม) ปรุงรสด้วยน้ำมะขามเปียก (30 กรัม) และน้ำตาลทราย (45 กรัม) จะได้แจ่วบองจิ้งหรีด

3. ผลของอุณหภูมิของตู้อบลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแจ่วบองจิ้งหรีดผง

นำแจ่วบองจิ้งหรีดในข้อ 2 มาวิเคราะห์ความชื้น (Moisture content) ด้วยเครื่อง Moisture analyzer (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น LP16 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) จำนวน 3 ซ้ำ บันทึกค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำแจ่วบองจิ้งหรีดปริมาณ 100 กรัม เกลี่ยตัวอย่างให้มีความหนาของชั้นเท่ากับ 3 มิลลิเมตร อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Binder รุ่น ED56 ประเทศเยอรมัน) โดยควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งที่ 3 ระดับ ได้แก่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ บันทึกการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างทุก 60 นาที จนกระทั่งพบแนวโน้มของการอบแห้งเข้าสู่สภาวะคงตัวของน้ำหนักและตัวอย่างมีความชื้น (น้ำหนักแห้ง) น้อยกว่าร้อยละ 10 (มผช.๑๓๔/๒๕๕๗ ; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2557) จึงสิ้นสุดการทดลอง จากนั้นนำตัวอย่างแจ่วบองจิ้งหรีดไปบดเป็นผงด้วยเครื่องบด (รุ่น JGY-2005B ยี่ห้อ JING GONG YI ประเทศจีน) บรรจุในถุงฟอยด์ที่มีสารดูดออกซิเจน (oxygen absorber) ปิดถุงด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ (รุ่น DZQ-400TE ยี่ห้อ BESPACKER ประเทศจีน) แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสต่อไป

4. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพแจ่วบองจิ้งหรีดผง

วิเคราะห์ความชื้น ด้วยเครื่อง Moisture analyzer (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น LP16 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) วิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ด้วยเครื่อง a_w analyzer (ยี่ห้อ Novasina รุ่นLabTouch-aw with CM-3 Sensor ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) วิเคราะห์สี ด้วยเครื่องวิเคราะห์สีในอาหาร (ยี่ห้อ HunterLab รุ่น Miniscan EZ ประเทศสหรัฐอเมริกา) ด้วยระบบ CIE ($L^* a^* b^*$ และ $L^* C^* h°$) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 โดยค่าความสว่าง (L^*) มีค่า 0-100, + a^* หมายถึงวัตถุมีสีแดง,-a^* หมายถึงวัตถุมีสีเขียว และ + b^* หมายถึงวัตถุมีสีเหลือง,-b^* หมายถึงวัตถุมีสีน้ำเงิน, C^* หมายถึงความเข้มสี และ $h°$ หมายถึงมุมของสี จำนวน 3 ซ้ำ บันทึกค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

วิเคราะห์คุณค่าโภชนาการตามวิธีการของ AOAC (1993) และ AOAC (2023) ได้แก่ ค่าพลังงาน ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และโซเดียม

5. การคืนรูปแจ่วบองจิ้งหรีดผง

ในการบริโภคแจ่วบองจิ้งหรีด จะต้องนำแจ่วบองจิ้งหรีดผงมาคืนรูป โดยใช้วิธีการคืนรูปตามการทดลองการคืนรูปผลิตภัณฑ์น้ำพริกอ่องกึ่งสำเร็จรูปของนภาพร และคณะ (2555) คือนำแจ่วบองอบแห้งผสมกับน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 1: 1 นาน 2 นาที แล้วคนผสมให้เข้ากันจะได้แจ่วบองจิ้งหรีดพร้อมบริโภค

จากนั้นวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ด้วยเครื่อง a_w analyzer (ยี่ห้อ Novasina รุ่น LabTouch-aw with CM-3 Sensor ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) และอัตราการดูดน้ำคืน (จำนวน 3 ซ้ำ บันทึกค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากค่าน้ำหนักแห้งก่อนคืนรูปและน้ำหนักที่คืนรูปแล้ว (Smith *et al.,* 1985) ดังนี้

$$\text{Rehydration} = \frac{\text{น้ำหนักที่คืนรูปแล้ว (กรัม)}}{\text{น้ำหนักแห้ง (กรัม)}}$$

6. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแจ่ว บองจิ้งหรีดผงคืนรูป

นำแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปริมาณ 5 กรัม ใส่ถ้วยพลาสติกขนาด 2 ออนซ์ ปิดฝาพลาสติกใส เก็บที่อุณหภูมิห้องก่อนการทดสอบ แล้วนำมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบ (9-Point Hedonic Scale) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้

ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน ทดสอบตัวอย่างทีละ 1 ตัวอย่าง ทำการพักระหว่างตัวอย่างนาน 15 นาที ในระหว่างการทดสอบให้ผู้ทดสอบดื่มน้ำล้างปากก่อนการทดสอบตัวอย่างถัดไป

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p \leq 0.05$ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชั่น 24

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การผลิตแจ่วบองจิ้งหรีด และแจ่วบองจิ้งหรีดผง และแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูป

แจ่วบองจิ้งหรีด (ข้อ 2) มีลักษณะทั่วไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน ข้นหนืด และมีค่าความชื้น (น้ำหนักเปียก) เท่ากับ 70.25±0.04 (Figure 1) เมื่อทำให้เป็นผงตามวิธีข้อ 3 และนำมาคืนรูปตามวิธีข้อ 5 พบว่า ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที จะมีสีน้ำตาลเข้ม เนื้อร่วนละเอียด (Figure 2) และเมื่อนำมาคืนรูปจะมีลักษณะทั่วไปคล้ายแจ่วบองจิ้งหรีด ข้นหนืดน้อยกว่า แต่มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น (Figure 3)

Figure 1 Fermented fish dip with added cricket powder

Figure 2 Dried fermented fish dip with added cricket powder

Figure 3 Rehydrated fermented fish dip with added cricket powder

2. ผลของอุณหภูมิของตู้อบลมร้อนต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแจ่วบองจิ้งหรีดผงและแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูป

นำแจ่วบองจิ้งหรีดมาให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 นาที แล้ววิเคราะห์ค่าความชื้น (น้ำหนักแห้ง) ค่าสี และค่า a_w พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว โดยความชื้นเริ่มต้นของแจ่วบองจิ้งหรีดเท่ากับร้อยละ 70.25 อบแห้งแจ่วบองจิ้งหรีดจนความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 3.50-4.00 ซึ่งเป็นค่าความชื้นคงที่ของผลิตภัณฑ์ Figure 4 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 120 นาที ในขณะที่อุณหภูมิ 70 และ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ใกล้เคียงกันที่เวลา 360 นาที ได้ค่าความชื้นแจ่วบองจิ้งหรีดร้อยละ 3.99±0.10, 3.68±0.12 และ 3.63±0.39 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 240 นาที ความชื้นร้อยละ 7.29±0.32 และ a_w เท่ากับ 0.56±0.31 ได้แจ่วบองจิ้งหรีดผงที่เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการต่อไป เนื่องจากใช้ระยะเวลาอบแห้งไม่นาน ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 และ a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ปลาร้าผง (มผช. ๑๓๔/๒๕๕๗ ; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2557) และน้ำพริกปลาร้า (มผช.๑๓๑/๒๕๖๖ ; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2566)

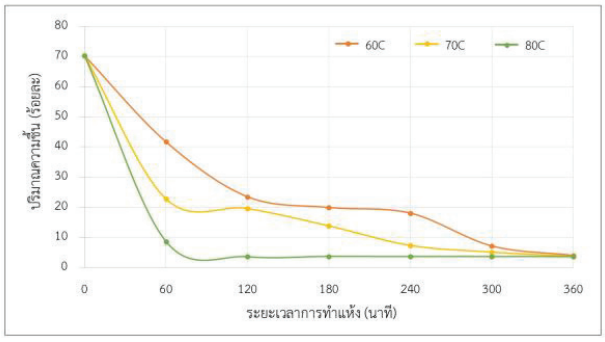


Figure 4 Relationship between moisture content and time of Dried fermented fish dip with added cricket powder using hot air oven

Table 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์แจ่วบองจิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด (0.33±0.00 ; $p \leq 0.05$) เนื่องจากใช้ระยะเวลาการอบแห้งเพียง 120 นาที จะได้ความชื้นไม่เกินร้อยละ 3 ในขณะที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งต่ำกว่า (0.11±0.00) และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

ค่าเฉลี่ยความสว่าง (L^*) และค่ามุมของสี (h°) ของแจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 30.44-30.80 และ 68.67-68.93 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าแจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับ 27.15 และ 65.41 ($p \leq 0.05$) แจ่วบองจิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยสีแดง (a^*) สีเหลือง (b^*) และค่าความเข้มสี (C^*) สูงสุด เท่ากับ 8.85±0.10, 22.96±0.38 และ 24.61±0.37[a] ตามลำดับ โดยแตกต่างกับแจ่วบองจิ้งหรีดผงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ยิ่งให้อุณหภูมิสูงขึ้นค่า L^* b^* และ C^* จะลดลงอาจเนื่องมาจากการเกิดสีน้ำตาลแบบ nonenzymatic browning (Posri, 2008) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนเรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction ; Ortiz *et al*., 2013) สอดคล้องกับการทดลองของ Pongdanai and Somsamorn (2020) ที่ศึกษาอุณหภูมิการทำแห้งแจ่วบองด้วยตู้อบลมร้อนต่อค่าสี L^* a^* b^* พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ (40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้ค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์แจ่วบองจิ้งหรีดผงทั้งสามตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.55-0.57 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.6 จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิห้อง (Fellows, 2009) ดังนั้น จึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นี้ที่อุณหภูมิห้องได้เป็นระยะเวลานาน

Table 2 Physical and chemical properties of Dried fermented fish dip with added cricket powder

Items	Treatments		
	60°C	70°C	80°C
Moisture content before drying (%)	70.25±0.04[ns]	70.25±0.02[ns]	70.25±0.03[ns]
Moisture content after drying (%)	3.99±0.24[a]	3.68±0.29[b]	3.63±0.21[b]
Drying rate (g water/g dry matter h^{-1})	0.11±0.00[b]	0.11±0.00[b]	0.33±0.00[a]
L*	30.44±0.48[a]	30.80±0.20[a]	27.15±0.44[b]
a*	8.31±0.23[b]	8.85±0.10[a]	8.62±0.22[ab]
b*	21.27±0.53[b]	22.96±0.38[a]	18.85±0.88[c]
*C**	22.83±0.58[b]	24.61±0.37[a]	20.730.90[c]
h°	68.67±0.05[a]	68.93±0.24[a]	65.41±0.44[b]
a_w	0.57±0.03[b]	0.55±0.04[a]	0.55±0.01[a]

Means within a row with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

นำแจ่วบองจิ้งหรีดผงมาคืนรูปตามวิธีการข้อ 5 แล้ววิเคราะห์ค่า a_w และอัตราการดูดน้ำคืน พบว่า แจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.79-0.80 ($p>0.05$) แจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการดูดน้ำคืนสูงกว่า 60 และ 70 องศาเซลเซียส ($p \leq 0.05$) ดังข้อมูลใน Table 3

อัตราการดูดน้ำคืนคือความสามารถในการดูดซับน้ำหรือรักษาน้ำไว้ในโครงสร้างอาหารบ่งบอกถึงลักษณะทาง

โครงสร้างของอาหารหลังการทำแห้งว่าถูกทำลายโดยความร้อนมากเพียงใด (ไตรภพ, 2563) การทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลานานส่งผลให้โครงสร้างอาหารเสียหายน้อยและให้ค่าอัตราส่วนการดูดน้ำคืนต่ำ (Doymaz, 2017) แสดงว่าโครงสร้างภายในตัวอย่างแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส เสียหายน้อยกว่า 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากใช้อุณหภูมิทำแห้งต่ำกว่าและเวลานานกว่า (Figure 4)

Table 3 Physical and chemical properties of rehydrated fermented fish dip with added cricket powder

Items	Treatments		
	60°C	70°C	80°C
a_w	0.80±0.02^{ns}	0.80±0.03^{ns}	0.79±0.03^{ns}
Rehydration ratio	0.94±0.02^{bc}	0.92±0.01^{a}	0.96±0.01^{c}

Means within a row with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} within a row is not significantly different ($p > 0.05$)

คุณค่าทางโภชนาการของแจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าพลังงานทั้งหมด ไขมันทั้งหมด โปรตีน คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด น้ำตาล และโซเดียม แสดงดัง Table 3

วิศรุต (2564) ศึกษาไขมัน โปรตีน และเกลือของแจ่วบองอบแห้ง จำนวน 2 สูตร และรายงานว่าสูตรที่ 1 มีค่าเป็นร้อยละ 15.23±0.18, 7.60±0.42 และ 15.80±0.11 สูตรที่ 2 มีค่าเป็น 18.37±0.10, 10.20±0.53 และ 17.15±0.11 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแจ่วบองจิ้งหรีดผงในงานวิจัยนี้ พบว่า แจ่วบองอบแห้งจากงานวิจัยของวิศรุต (2564) มีพลังงานและเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) มากกว่าแต่มีโปรตีนต่ำกว่า เนื่องจากจิ้งหรีดมีปริมาณโปรตีนถึง 53.4±0.04 (น้ำหนักแห้ง) แสดงให้เห็นว่าแจ่วบองอบแห้งที่มีส่วนผสมของจิ้งหรีดผงสามารถเป็นอาหารทางเลือกที่เสริมคุณค่าอาหารทางโปรตีนได้ (อรนุช และคณะ, 2561)

นอกจากนี้ยังพบว่าแจ่วบองจิ้งหรีดผงในงานวิจัยนี้มีโซเดียมน้อยกว่าแจ่วบองผงอบแห้งจากงานวิจัยของศนันธร และคณะ (2564) และงานวิจัยของสริต และคณะ (2549) ที่รายงานว่ามีโซเดียมเป็นร้อยละ 6.11 กรัม และ 7.5-13.3 กรัม ตามลำดับ

Table 4 Nutritional values of Dried fermented fish dip with added cricket powder

Items (Amount/100g)	Treatments at 70°C
Total Energy (Kcal)	377
Total Fat (g)	12.3
Protein (Nx6.25) (g)	26.3
Total Carbohydrate (g)	40.29
Total Sugar (g)	13.7
Sodium (mg)	5,948

3. ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูป

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (Table 5) พบว่า แจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะสูงสุดจากผู้ทดสอบ จำนวน 50 คน ($p \leq 0.05$) ในขณะที่คะแนนความชอบแจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในทุกคุณลักษณะมีค่าน้อยที่สุด ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสี และอัตราการดูดน้ำคืน กล่าวคือ แจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่า L^* a^* b^*, C^*, h° น้อยกว่าอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส และมีอัตราการดูดน้ำคืนสูงกว่า อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongdanai and Somsamorn (2020) ที่ศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิการทำแห้งผลิตภัณฑ์แจ่วบองด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส แล้วประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแจ่วบองอบแห้งแบบคืนรูปด้วยน้ำ พบว่า

ผู้ทดสอบจำนวน 45 คน ให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น และความชอบโดยรวมแจ่วบองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส

Table 5 Means of 9-Point Hedonic Scale on sensory characteristics of rehydrated dried fermented fish dip with added cricket powder

Attributes	Treatments		
	60°C	70°C	80°C
Appearance	7.00±0.67[a]	7.60±0.52[a]	6.50±0.71[b]
Color	6.40±0.52[b]	7.00±0.47[a]	5.50±0.85[b]
Odor	7.20±0.42[a]	7.40±0.52[a]	6.10±1.20[b]
Flavor	7.20±0.42[b]	7.80±0.42[a]	5.60±0.84[c]
Texture	6.80±0.42[b]	7.40±0.70[a]	6.70±0.48[b]
Overall liking	6.60±0.52[b]	7.60±0.52[a]	6.10±0.74[b]

Means within a row with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุปผลการทดลอง

แจ่วบองจิ้งหรีดอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 360 นาที อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงสุด และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 240 นาที ความชื้นร้อยละ 13.79±0.68 a_w เท่ากับ 0.56±0.31 ได้แจ่วบองจิ้งหรีดผงที่เหมาะสม เนื่องจากใช้ระยะเวลาอบแห้งไม่นาน ค่าความชื้น และค่า a_w เป็นไปตามมผช.๑๓๔/๒๕๕๗ และ มผช.๑๓๑/๒๕๖๖ อีกทั้งยังมีโปรตีนสูงร้อยละ 26.3 กรัม แจ่วบองจิ้งหรีดผงทั้งสามตัวอย่างมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.55-0.57 แจ่วบองจิ้งหรีดผงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ย *L* a* b**, C* และ h° มากที่สุด ในขณะที่แจ่วบองจิ้งหรีดผงคืนรูปทั้งสามตัวอย่างมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.79-0.80 และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการดูดน้ำคืนสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนให้คะแนนความชอบแจ่ว บองจิ้งหรีดคืนรูปอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในทุกคุณลักษณะสูงสุด ดังนั้น อุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อนแจ่วบองจิ้งหรีดที่เหมาะสมคือ 70 องศาเซลเซียส

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่สนับสนุนงบประมาณตลอดโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ. (2558). *การแปรรูปสัตว์น้ำ*. กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ชุตินันท์ สงวนประสิทธิ์. (24 มกราคม 2562). รู้ยัง! ยา ขนมที่กินวันนี้อาจมีส่วนผสมของแมลงอยู่ก็ได้ แล้วธุรกิจแมลงโตแค่ไหน? *Brand Inside*. http://brandinside.asia/insectbusiness-future/

ไตรภพ พาหอม. (2563). *ลักษณะเฉพาะของการทำแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปูอัด*. สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร, สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ณวรา เปลี่ยนบุญเลิศ. (มปป, 2565). *Recipe แจ่วบอง (ปลาร้าบอง)*. KRUA.CO. https://krua.co/recipe/jaew-bong

นภาพร ดีสนาม, อรทัย บุญทะวงศ์, ชณิชา จินาการ, & วิไลวรรณ ชูเกียรติภิญโญ. (2555). การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกอ่องกึ่งสำเร็จรูป. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, 35(1), 93-103.

วิศรุต ศิริพรกิตติ. (2564). ผลของกระบวนการผลิตต่ออายุการเก็บรักษาแจ่วบองอบแห้ง. *กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.*

ศนันธร พิชัย, ปาริชาติ ราชมณี และ ญาณิศา โพธิ์รัตน์โส. (2564). การพัฒนาผลิตภัณฑ์แจ่วบองอบแห้ง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, 20-26.

สริต สุปันนุช, รินธิวา ดวงสนิท และ วสาวี พิชัย. (2549). ปลาร้าก้อนสมุนไพรบรรจุกระป๋อง [ปริญญาครุศาสตร์บัณฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี].

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (มปป, 2566). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน น้ำพริกปลาร้า (มผช.131/2566). ELIB. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps131_66(%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2).pdf

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (มปป, 2557). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ปลาร้าผง (มผช.134/2557)*. ELIB. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0134_57(%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%9C%E0%B8%87).pdf

อรนุช สีหามาลา, หนูเดือน สาระบุตร, พรประภา ชุนถนอม และศุภชัย ภูลายดอก. (2561). คุณค่าทางโภชนาการของแมลงกินได้ในจังหวัดกาฬสินธุ์. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, *36*(2), 98-105.

AOAC International. (1993). *Methods of analysis for nutrition labeling*. Arlington, Virginia.

AOAC International. (2023). *Official Methods of Analysis*. The Association of Official Analytical Chemists. Maryland, U.S.A.

Chen, X., Feng, Y., & Chen, Z. (2009). Common edible insects and their utilization in China. *Entomological Research*, *39*, 299-303.

Doymaz, I. (2017). Drying kinetics, rehydration ratio and color characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat Mass Transfer*, *53*, 25-35.

Fellows, P. J. (2009). *Food Processing Technology: Principle and Practice* (3rd ed.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

Hanboonsong, Y., Rattanapan, A., Waikakul, Y., & Liwavanich, A. (2001). Edible Insect Survey in Northeastern Thailand. *KhonKaen Agriculture Journal*, *29*(1), 35-44.

Jino, T., Surawang, S., & Wachirisiri, K. (2021). Chemical Composition and Optimum Condition of Protein Concentrate Extraction from Commercial Crickets. *Thai Journal of Science and Technology*, *10*(1), 65-73.

Ortiz, J., Lemus-Mondaca, R., Vega-Galvez, A., Ah-Hen, K., Puente-Diaz, L., Zura-Bravo, L., & Aubourg, S. (2013). Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (Salmo salar L.) fillets. *Food Chemistry*, *139*, 162-169.

Pongdanai, D., & Somsamorn, G. (2020). Effect of Drying Temperature on Quality Parameters of Thai Fermented Fish Dip (Jaew Bong). *International Journal of Food Science*, *9*, 251-263.

Posri, W. (2008). The study of extrinsic and intrinsic cues in fermented fish in chili paste to develop consumer acceptance in the North-East and the South of Thailand. *TSRI e-Library*. https://elibrary.tsri.or.th/project_content.asp?PJID=MRG4680179

Smith, D. H., Rao, R. M., Lizzao, J. M., & Champagne, E. (1985). Chemical treatment and process modification for producing improved quick-cooking rice. *Journal of Food Science*, *50*(4), 926-931.

Sogari, G., Bogueva, D., & Marinova, D. (2019). Australian Consumers' Response to Insects as Food. *Agriculture*, *9*, 108-116.

Ulloa, J. A., Ibarra-Zavala, S. J., Ramirez-Salas, S. P., Rosas-Ulloa, P., Ramirez-Ramirez, J. C., & Ulloa-Rangel, B. E. (2015). Chemical, physicochemical, nutritional, microbiological, sensory and rehydration characteristics of instant whole beans (Phaseolus vulgaris). *Food Technology and Biotechnology*, *53*(1), 48-56.

Yhoung-Aree, J., & Viwatpanich, K. (2005). Edible insects in the Lao PDR, Myanmar, Thailand and Vietnam. In *Ecological implications of mini-livestock*. Enfield, New Hampshire, Science Publisher, Inc.

Yi, L., Lakemond, C. M. M., Sagis, L. M. C., Einner-Schadler, V., Huis, A. V., & Boekel, M. A. J. S. V. (2013). Extraction and characterization of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, *141*(4), 3341-3348.

ผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยว

Effects of freeze-drying on qualities and acceptance of kao tom mud snack

อัณนภา สุขลิ้ม[1*]
Annapha Suklim[1*]

Received: 19 December 2023 ; **Revised**: 5 April 2024 ; **Accepted**: 14 May 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดรูปแบบใหม่ในรูปแบบของขนมขบเคี้ยว โดยศึกษาโดยใช้กล้วย 3 ชนิดคือ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม เลือกระยะสุกที่มีสีเหลืองทั้งผล หั่นกล้วยแบบตัดขวางเป็นชิ้นวางบนข้าวเหนียวมูน จากนั้นนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิประมาณ -56 °C ความดัน 0.1 ปาสคาล นาน 72 ชม พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้กล้วยมีสีเหลืองที่อ่อนลงโดยค่า *b** ของกล้วยทั้ง 3 ชนิดลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะกล้วยไข่ ($p<0.05$) ปริมาตรของชิ้นกล้วยเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปริมาตรกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 64.72 และ 69.94 สัมพันธ์กับโครงสร้างภายในที่มีความเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ความแข็งของชิ้นกล้วยหอมวัดโดยใช้แรงกดให้ตัวอย่างชิ้นกล้วยหอมแตกออกน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ ($p<0.05$) แต่เมื่อวัดความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทั้งชิ้นที่มีส่วนประกอบของกล้วยและข้าวเหนียวจะพบว่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 11,656.26-15,189.87 กรัมแรง ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.35-2.40 และค่า a_w 0.169-0.181 ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับโดยรวมผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าสูงกว่ากล้วยไข่ ($p<0.05$)

คำสำคัญ: ข้าวต้มมัด, ขนมขบเคี้ยว, การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

Abstract

The objective of this research was to evaluate the effects of freeze-drying on the qualities and acceptance of a new Kao Tom Mud snack product using three varieties of bananas: Khai, Namwa, and Hom. Ripened bananas, indicated by yellow peel color, were selected, peeled, sliced, placed on top of coconut cream-cooked sticky rice, and then freeze-dried at -56°C and 0.1 Pa pressure for 72 hours. Results showed that freeze-drying significantly deteriorated the yellow color (b* values) of all banana varieties, especially the Khai variety. The volume of sliced Namwa and Hom bananas increased by 64.72% and 69.94%, respectively, due to their porous microstructure under Scanning Electron Microscope. The hardness, as determined by breaking forces, of Hom banana slices was lower than that of Namwa and Khai bananas ($p < 0.05$). However, when the banana slices and sticky rice components were combined as the Kao Tom Mud product, the hardness of the Kao Tom Mud snacks with the three different banana varieties was not statistically different ($p < 0.05$), showing forces ranging from 11,656.26 to 15,189.87 g. The product's moisture content and water activity (aw) were in the range of 2.35-2.40% and 0.169-0.181, respectively. Freeze-dried Kao Tom Mud snacks made with Hom and Namwa bananas were preferred by the sensory panel ($p < 0.05$).

Keywords: Kao tom mud, Snack, Freeze-drying

---

[1] หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี เบอร์โทรศัพท์ 025293002

[1] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage Pathum Thani Province Phone 025293002

* Corresponding author. Email: annapha@vru.ac.th

บทนำ

กล้วย (*Musa* spp.) เป็นผลไม้ในวงศ์ Musaceae ที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกได้ในพื้นที่เขตร้อนและกึ่งร้อน ปลูกง่าย ให้ผลผลิตทั้งปี กล้วยเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่มีการปลูกเพื่อตลาดภายในและการส่งออก ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตกล้วยมากเป็นลำดับที่ 20 ของโลก โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกทางการค้าคือ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่ โดยมีผลผลิตรวมถึง 1,075,251 ตันต่อปี (ทีเอ็นเอ็น, 2566) ไทยส่งออกกล้วยทั้งในรูปแบบของผลกล้วยสด กล้วยอบแห้ง และกล้วยแปรรูปไปยังประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

กล้วยชนิดสำคัญที่ส่งออกคือกล้วยหอมและกล้วยไข่ ไทยส่งออกกล้วยสดไปยังประเทศต่างที่สำคัญ ได้แก่ จีน ญี่ปุ่น ฮ่องกง มาเลเซีย และกัมพูชา นอกจากผลกล้วยสดแล้วยังส่งออกกล้วยอบแห้งไปยังอเมริกาและสิงคโปร์ สถิติการนำเข้าสินค้ากล้วยแปรรูปและกล้วยสดจากประเทศไทยของสหรัฐอเมริกาในปีพ.ศ. 2565 พบว่ามีมูลค่าสูงถึง 3.3 ล้านเหรียญสหรัฐหรือประมาณ 115.5 ล้านบาท โดยปริมาณการนำเข้าเพิ่มขึ้นจากปีพ.ศ. 2564 ถึงร้อยละ 25.10 (สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ, 2566) ปัจจุบันรัฐบาลไทยมีการส่งเสริมให้มีการปลูกและแปรรูปกล้วยเพื่อตอบสนองความต้องการบริโภคภายในประเทศให้มากขึ้นและตอบสนองความต้องการการบริโภคในรูปแบบใหม่

กล้วยสำหรับบริโภคสดหลังจากเก็บเกี่ยวจะถูกนำมาบ่มเพื่อให้สุกสม่ำเสมอกัน กล้วยหอมมีระยะการสุกแบ่งออกเป็น 8 ระยะตามการเปลี่ยนแปลงของสีของเปลือกกล้วย (Peel Color Index, PCI) (CSIRO, 1972) ระยะการสุกกล้วยที่เหมาะสมสำหรับการบริโภคสดอยู่ที่ระดับ 6 หรือ 7 ซึ่งเป็นระยะสุกหรือระยะสุกเต็มที่ (เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2538) ส่วนกล้วยไข่มีระยะการสุกของกล้วยไข่แบ่งออกเป็น 5 ระดับ (จินดา ศรศรีวิชัย, 2541) ในระหว่างกระบวนการสุกกล้วยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่าง ๆ เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้บ่มสุก (Climacteric fruit) ที่เนื้อเยื่อค่อนข้างนิ่ม ง่ายต่อการเน่าเสีย เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการ คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสอย่างรวดเร็ว จึงนิยมนำไปแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ดังจะเห็นผลิตภัณฑ์จากกล้วยหลากหลายรูปแบบเช่น กล้วยอบแห้ง กล้วยฉาบ กล้วยอบเนย ทอฟฟี่ แป้งกล้วย กล้วยในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง กล้วยกวน กล้วยตาก นอกจากนี้ยังมีการนำไปประกอบอาหารคาวหวานเช่น กล้วยเชื่อม ขนมกล้วย ข้าวต้มมัด

การทำแห้งเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถลดปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ของผลิตภัณฑ์จนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กิจกรรมของเอนไซม์ การเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษา อย่างไรก็ดีการทำแห้งแบบดั้งเดิมโดยใช้ลมร้อนมักมีผลทำให้เกิดการเสื่อมสลายของคุณภาพทางกายภาพและเคมีต่าง ๆ เช่น กล้วยเกิดการหดตัว เกิดการเปลี่ยนสีเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค จึงมีการพัฒนาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งหรือการทำแห้งแบบระเหิด (Freeze drying or lyophilization) ขึ้นเพื่อใช้ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งมีข้อดีหลายประการเช่น คงรักษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการดีกว่าการทำแห้งแบบดั้งเดิม ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำแห้ง ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาในสภาวะของแห้งได้นาน เป็นต้น (Krokida *et al*., 2001 ; Shukla, 2011)

ปัจจุบันการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจึงถูกนำมาใช้ในกับผักและผลไม้หลายชนิด เช่น หน่อไม้ฝรั่ง แครอท พริกหวาน ฟักทอง มะเขือเทศ แอปเปิ้ล ฝรั่ง สตรอเบอรี่ มะละกอ แบลคเบอรี่ สับปะรด มะม่วง กล้วย เป็นต้น คุณภาพและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นผลโดยตรงมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ เช่น โครงสร้าง ความเป็นรูพรุน ความหนาแน่น เนื้อสัมผัส สี ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง สภาวะหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความดัน (pressure chamber) อัตราการแช่แข็ง (freezing rate) ระยะเวลาการทำแห้ง (Nowak & Jakubczyk, 2020 ; Bhatta *et al*., 2020 ; Serna-Cock *et al*., 2015) Krokida *et al.* (1998) ศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งชิ้นกล้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความหนา 8 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแช่แข็งที่ -35 °C นาน 48 ชม. ทำแห้งโดยใช้ความดัน 3-300 ปาสคาล อุณหภูมิ -50 ถึง -8 °C นาน 24 ชม พบว่าความเป็นรูพรุนของชิ้นกล้วยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ -50 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นกล้วยทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าลดลงจาก 1900 เหลือ 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

สภาวะที่ใช้ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วย การทำแห้งโดยใช้ความดัน 8 ปาสคาล อุณหภูมิ -40 °C นาน 72 ชม. กับชิ้นกล้วยหนา 3 มิลลิเมตร ที่ผ่านการแช่แข็งที่ -24 °C นาน 72 ชม. ทำให้ค่าสี L^* เพิ่มขึ้น ส่วนค่า a^* และ b^* ลดลง(Valentina *et al*., 2016) Jiang *et al*. (2010) เปรียบเทียบสีของชิ้นกล้วยความหนา 5 มิลลิเมตรในขั้นตอนของการแช่แข็งก่อนการทำแห้ง -30 °C และภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 °C กับสีของชิ้นกล้วยสดพบว่า สีของชิ้นกล้วยในแต่ละขั้นตอนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* a^* b^* เล็กน้อย สีจะเปลี่ยนแปลงชัดเจนในกรณีการทำแห้งชิ้นกล้วยแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟ (microwave freeze drying)

ร่วมด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นกล้วยภายหลังการทำแห้งเกิดการหดตัวลง (shrinkage) เล็กน้อย การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของกล้วยสามารถทำได้โดยการปรับสภาพกล้วยด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้กรดแอสคอร์บิคและมิวซิเลจ (Milani *et al*., 2020)

Oikonomopoulou *et al*. (2011) ศึกษาผลของสภาวะการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่า ความหนาแน่นและความเป็นรูพรุนของข้าวฟรีสดรายขึ้นอยู่กับสภาวะต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาการต้มหรือการให้ความร้อนข้าว และความดันที่ใช้ในสภาวะการอบแห้ง ในระหว่างการต้มเมล็ดข้าวจะดูดน้ำและเกิดการขยายปริมาตรเมื่อนำไปแช่แข็งและทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการระเหิดของน้ำแข็งทำให้เกิดรูพรุน ความเป็นรูพรุนหรือปริมาณรูพรุนจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดเข้าไป ระยะเวลาการต้มข้าวที่นานขึ้นส่งผลให้ความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นของเมล็ดข้าวลดลง ทั้งนี้ความเป็นรูพรุนและความหนาแน่นของเมล็ดข้าวยังขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในการทำแห้ง โดยที่ความเป็นรูพรุนจะแปรผกผันกับความดัน ส่วนความหนาแน่นของเมล็ดข้าวจะแปรผันตามความดันที่ใช้ในสภาวะการอบแห้ง ในกรณีของข้าวพบว่า ความเป็นรูพรุนของข้าวเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40-50 เมื่อต้มข้าวนาน 8-24 นาที เปรียบเทียบกับระยะเวลาต้มข้าวน้อยที่สุดที่ 4 นาที

การใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อผลิตขนมขบเคี้ยวที่มีข้าวหรือข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบร่วมกับผลไม้นั้นมีข้อมูลงานวิจัยค่อนข้างจำกัด สณฑกานต์ คุณเอนก และคณะ (2565) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสดราย ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมะม่วงฟรีสดรายที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาดนั้นไม่ปรากฏข้อมูลผลการศึกษาวิจัย การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณภาพและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัด ซึ่งเป็นข้าวต้มมัดที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นข้าวต้มมัดรูปแบบใหม่ในรูปแบบของข้าวต้มมัดขบเคี้ยว โดยใช้กล้วย 3 ชนิดได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่

วิธีดำเนินงาน

1. การเตรียมวัตถุดิบ

กล้วยน้ำว้า [Musa (ABB group) “Klaui Nam Wa”] กล้วยหอม [Musa (AAA group) “Klaui Hom Thong” กลุ่มย่อย Gros Michel] และกล้วยไข่ [Musa (AA group) “Kluai Khai กลุ่มย่อย Sucrier] ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี โดยเลือกซื้อผลกล้วยในระยะผลสุกที่เปลือกทั้งผลมีสีเหลือง กล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าระยะการสุกที่ 6 ตามมาตรฐาน Peel Color Index (PCI) (CSIRO, 1972) ส่วนกล้วยไข่ระยะการสุกที่ 4 (จินดา ศรศรีวิชัย, 2541) และเลือกผลที่มีรูปร่างและขนาดสม่ำเสมอ ล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก และหั่นตัดขวางเป็นแว่นขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร กล้วยหลังจากหั่นแล้วจะถูกนำไปใช้ทันที

วัตถุดิบข้าวเหนียวและใบเตยหอม ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี ข้าวเหนียวเป็นข้าวเหนียวพันธุ์กข 6 ข้าวเก่าประมาณ 4 เดือน ส่วนวัตถุดิบอื่นได้แก่ กะทิ เกลือ น้ำตาลทราย ซื้อจากโลตัสซูเปอร์มาร์เก็ต

2. การทำข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ศึกษาชนิดของกล้วย 3 ชนิดได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม และกล้วยไข่ ที่มีต่อคุณภาพของข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีขั้นตอนการทำดังนี้ นำข้าวเหนียว 150 กรัม ที่ผ่านการล้างทำความสะอาดและแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง นาน 8 ชั่วโมง มาผัดผสมกับกะทิ 200 กรัม น้ำใบเตย 50 กรัม และเกลือ 5 กรัม นาน 30 นาที ที่อุณหภูมิ 90 °C โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ

เมื่อครบเวลาเติมน้ำตาลทราย 75 กรัม และผัดหรือกวนผสมให้เข้ากันนาน 5 นาที พักทิ้งไว้ให้เย็นโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที ตักใส่พิมพ์ทรงกลมหรือถาดหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. หลุมละ 5 กรัม เกลี่ยให้มีความหนาเท่ากันประมาณ 7 มิลลิเมตร ตักกะทิ 3 กรัมหยอดลงบนด้านหน้าของข้าวเหนียว จากนั้นนำกล้วยที่หั่นเป็นแว่นหนา 3 มิลลิเมตร วางลงด้านบน นำพิมพ์ไปแช่แข็งในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 °C นาน 48 ชม ก่อนการทำแห้งแบบเยือกแข็งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer) รุ่น Freezone 6 plus (Labconco, USA) ใช้เวลานาน 72 ชม โดยระหว่างการทำแห้งเครื่องจะทำงานที่อุณหภูมิประมาณ -56 °C ความดัน 0.1 ปาสคาล

2.1.1 คุณภาพทางกายภาพ

1) ค่าสี CIE L^* a^* b^* วัดค่าสีของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดสีของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวด้วยเครื่องวัดสี (color meter) (Minolta, Japan) แสดงผลเป็นค่า L^* แสดงถึงความสว่าง ค่า a^* แสดงถึงความเป็นสีแดง ($+a^*$) และความเป็นสีเขียว ($-a^*$) ค่า b^* แสดงถึงความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) และความเป็นสีน้ำเงิน ($-b^*$)

2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (มม.) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวจำนวน 2 ตำแหน่งต่อชิ้นด้วย Vernier Caliper (Mitutoya, Japan) คำนวณการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (%) (จารุวรรณ กุลวิศร, 2550)

$$\% \text{ change} = \frac{X_i - X}{X_i} \times 100$$

X_t = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความหนาก่อนการทำแห้ง

X = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความหนาหลังการทำแห้ง

3) ปริมาตร (ซม^3) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยแยกวัดในส่วนของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวใช้เทคนิคการแทนที่ (displacement techniques) คำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (%) (Swasdisevi *et al*., 2007)

$$\% \text{ volume change} = \frac{V_i - V}{V_i} \times 100$$

V_t = ปริมาตรก่อนการทำแห้ง

V = ปริมาตรหลังการทำแห้ง

4) โครงสร้างจุลภาค (microstructure) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของกล้วยหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-5410LV (Jeol Ltd., Japan) เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างชิ้นกล้วยที่ตัดตามแนวขวางแล้วไปติดลงบน stub (mounting) ฉาบทองที่ผิวตัวอย่างโดยใช้เครื่องฉาบผิว (Sputter Coater) Polaron SC7640 (1kV, 10 mA เวลา 4 นาที) (Quorum Technologies, UK) นำกล้วยที่ฉาบทองไปส่องดูโครงสร้างโดยใช้ Accelerating voltage 15 kv ถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50 เท่าและ 150 เท่า

5) เนื้อสัมผัส (Texture) วัดเนื้อสัมผัสโดยวัดความแน่นเนื้อ (firmness) ของชิ้นกล้วยสดใช้หัววัด P/2 หัววัดทรงกระบอกขนาด 2 มม. วัดแรงกด (compression) หัววัดลงไปในตัวอย่างระยะทาง 6 มม. ด้วยความเร็ว 1 มม/วินาที และวัดความแข็ง (hardness) ของข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและส่วนของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียว โดยการวางตัวอย่างลงบน Crisp Fracture Support Rig (HDP/CFS) วัดแรงกดที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตกออกโดยใช้หัววัด P/0.25S ทรงกลมขนาด ¼ นิ้ว กดลงไปในตัวอย่างระยะทาง 6 มม. ด้วยความเร็ว 1 มม./วินาที ใช้เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT. Plus (Stable Micro Systems, UK) ทำการวัดตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.1.2 คุณภาพทางเคมี

1) Water activity (a_w) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชิ้นกล้วย ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น ด้วย Aqualab Series 2 (Decagon, USA)

2) ปริมาณความชื้น (% moisture content) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชิ้นกล้วย ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น (AOAC, 2000)

3) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของข้าวต้มมัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยวัดในส่วนของชิ้นกล้วย ข้าวเหนียว และข้าวต้มมัดทั้งชิ้น สุ่มตัวอย่างกล้วยและข้าวเหนียวมาทำการปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสม บีบสกัดส่วนที่เป็นของแหลวเพื่อนำไปวัดค่า pH ด้วย pH meter (Eutech instrument, USA)

4) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid) ของกล้วยและข้าวเหนียว โดยใช้ Digital refractometer (Atago, Japan)

2.1.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวม ใช้ผู้ทดสอบกึ่งฝึกฝนจำนวน 20 คน โดยผู้ทดสอบแต่ละคนจะได้ตัวอย่างแบบสุ่มคนละ 3 ตัวอย่างที่มีรหัสเป็นเลขสุ่ม 3 หลัก ให้คะแนนการยอมรับโดยใช้สเกลการยอมรับแบบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) (9 = ชอบมากที่สุด ถึง 1 = ไม่ชอบมากที่สุด)

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) สำหรับคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางเคมี วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบลอค (Randomized Complete Block Design, RCBD) สำหรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ส่วนการเปรียบเทียบค่าสีก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งใช้ Independent Sample T-test โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p<0.05$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

คุณภาพทางกายภาพ

ค่าสี CIE *L* a* b**

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อสีของข้าวต้มมัด ซึ่งในที่นี้แยกพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของชิ้นกล้วยด้านบนและส่วนของข้าวเหนียวด้านล่าง ในส่วนของชิ้นกล้วยพบว่าสีของกล้วยทั้ง 3 ชนิดคือกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วย

หอมเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้เด่นชัดคือ ค่าสี *b** หรือค่าความเป็นสีเหลืองของกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (Table 1) ส่วนค่าสี *L** และค่าสี *a** เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่า *L** ความสว่างของกล้วยน้ำว้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสี *a** ความเป็นสีแดงของกล้วยหอมมีค่าลดลงหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ($p<0.05$) สีที่ปรากฏต่อสายตาของชิ้นกล้วยไข่เปลี่ยนจากสีเหลืองส้มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน

ส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมสีเปลี่ยนจากสีเหลืองขาวเป็นสีขาวเหลืองดัง Figure 1 สอดคล้องกับ Valentina *et al*. (2016) และ จารุวรรณ กุลวิศว (2550) ที่ศึกษาผลของการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อคุณลักษณะของกล้วย Valentina *et al.* (2016) พบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้เนื้อกล้วยที่มีสีเหลืองออกขาวจะเปลี่ยนเป็นสีขาวเหลือง โดยค่าสี *b** ลดลงจาก 34.10 เหลือ 20.39 ค่าสี *a** ลดลงจาก 10.37 เหลือ 6.92 ($p<0.05$) ส่วนค่าความสว่าง *L** ไม่เปลี่ยนแปลง จารุวรรณ กุลวิศว (2550) รายงานว่า กล้วยแผ่นที่ทำจากกล้วยหอมเมื่อนำมาอบแห้งโดยใช้วิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีสีครีมออกขาวซีด

สีของกล้วยแผ่นทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยสดหรือกล้วยที่ผ่านการแช่ในสารละลายซูโครสก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งกล้วยด้วยวิธีอื่นๆ กล้วยหอมสดที่อบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด จะทำให้กล้วยแผ่นมีสีเหลืองเข้มขึ้น มีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลแดงเข้ม (จารุวรรณ กุลวิศว, 2550) Krokida *et al.* (2001) ใช้กล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบออสโมซิส (osmotic dehydration) ในสารละลายซูโครส 50% ที่ 40 °C อบแห้งในตู้อบลมร้อนที่ 70 °C นาน 10 ชม ก่อนนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าสีของกล้วยภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ เช่น การอบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ โดยที่ค่า *L** ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ค่อนข้างคงที่ ส่วนค่า a* เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ค่า *b** เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมาที่พบว่าค่า *L** จะลดลงมาก เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

Table 1 CIE *L** *a** *b** of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and after freeze drying

Component	L*		a*		b*	
	Before	After	Before	After	Before	After
Banana						
Khai	65.94±2.23^{ns}	68.38±2.44	-10.93±1.05^{ns}	-11.67±1.65	46.20±2.13^{a}	31.79±2.15^{b}
Nam wa	78.13±2.06^{b}	82.45±1.46^{a}	-15.27±0.85^{ns}	-15.62±0.34	26.50±2.16^{a}	20.13±0.67^{b}
Hom	76.18±2.31^{ns}	78.98±4.59	-17.37±0.47^{a}	-15.57±1.53^{b}	32.21±2.29^{a}	22.81±1.56^{b}
Rice						
Sticky rice	51.96±2.00^{b}	64.21±2.68^{a}	-14.99±0.42^{ns}	-14.86±0.23	8.83±0.62^{b}	16.74±0.49^{a}

^{ab} Means in the same row with different letters are statistically different ($p<0.05$)

^{ns} Means in the same row are not statistically different ($p>0.05$)

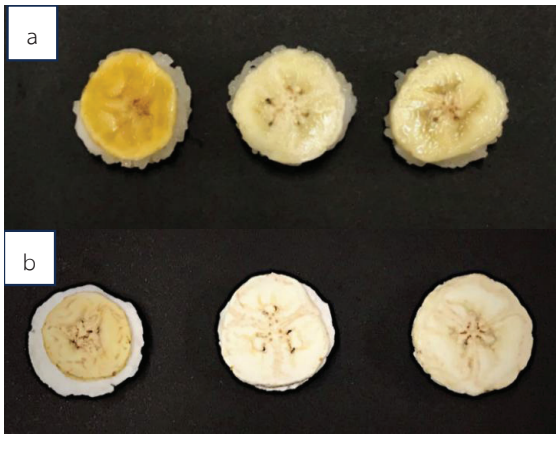


Figure 1 Kao Tom Mud snack made with 'Khai' 'Namwa' and 'Hom' banana (a) before freeze dying (b) after freeze drying

Krokida *et al.* (2001) กล่าวว่าสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อทำให้เกิดการระเหิดของน้ำแข็งเป็นสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำและอุณหภูมิที่ต่ำมากจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่มักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำแห้ง Jiang *et al*. (2010) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเคมีกายภาพของกล้วยคาเวนดิช (Cavendish) แผ่นโดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับไมโครเวฟ ก็พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสีจากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้ไมโครเวฟ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชั่นขึ้นได้

ส่วนของข้าวเหนียวที่อยู่ด้านล่างของชิ้นผลิตภัณฑ์ข้าวตัมมัดพบว่าข้าวเหนียวก่อนทำแห้งซึ่งเป็นข้าวเหนียวสุกมีลักษณะเป็นเม็ดที่มีความใส หลังจากการทำแห้งเปลี่ยนเป็นจะเป็นเม็ดที่มีความขาวขุ่นทึบแสงมากขึ้นและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้ค่าสี L^* และค่าสี b^* เพิ่มขึ้น ($p<0.05$) (Table 1) การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวเหนียวมูนก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่มีข้อมูลรายงาน มีเพียงการรายงานค่าสีของข้าวเหนียวมูนหลังการทำแห้งดังนี้ สณฑกานต์ คุณเอนก และคณะ (2565) พบว่า สีของข้าวเหนียวมูนที่อยู่ด้านล่างของชิ้นข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสดรายที่ทำจากข้าวเหนียวมูน 300 กรัมกับน้ำกะทิในปริมาณต่าง ๆ กัน 100 150 และ 200 มล. มีค่า L^* 84.34-84.63 ค่า a^* -0.75 ถึง -0.79 และค่า b^* 7.69-7.96 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองเนื่องมาจากตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง สภาวะที่ใช้ในการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความแตกต่างกัน

Table 2 Diameter (mm) and thickness (mm) of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and after freeze drying and diameter and thickness changes (%)

Component	Diameter (mm)		Diameter changes (%)	Thickness (mm)		Thickness changes (%)
	Before	After		Before	After	
Banana						
Khai	23.5±0.7	21.6±0.9	-8.07^{ns}	3.3±0.4	3.8±0.5	+5.47^{ns}
Namwa	29.8±0.5	27.6±1.2	-7.71	4.1±0.4	4.4±0.3	+7.11
Hom	32.2±0.3	30.1±0.4	-6.65	4.1±0.6	4.5±0.2	+9.64
Rice						
Sticky rice	29.7±0.6	27.8±1.3	-6.36	6.9±0.6	7.0±1.0	+1.45

^{ns} Means in the same column within the group (i.e. Banana group) are not statistically different ($p>0.05$)

2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.) และความหนา (มม.) ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวถูกวัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา (ร้อยละ) พบว่าชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ลดลงภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยกล้วยไข่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ -8.07 และกล้วยหอมเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ -6.65 อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกล้วยทั้ง 3 ชนิดทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) (Table 2) ส่วนของข้าวเหนียวก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเช่นกันโดยมีขนาดลดลงร้อยละ -6.36

ส่วนความหนาเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิดภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความหนาเพิ่มขึ้น กล้วยหอมเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนามากที่สุดร้อยละ 9.64 ตามด้วยกล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ร้อยละ 7.11 และ 5.47 แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนข้าวเหนียวมีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดัง Table 2 ผลการทดลองที่ได้ตรงกันข้ามกับ จารุวรรณ กุลวิศว (2550) ที่พบว่า การอบแห้งกล้วยหอมแบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งทำให้ชิ้นกล้วยเกิดการหดตัวทั้งทางด้านความหนาและด้านรัศมี/เส้นผ่าศูนย์กลาง โดยทำให้ความหนาหดตัวร้อยละ 25.55 รัศมีหดตัวร้อยละ 1.80 โดยให้เหตุผลว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยวิธีแบบต่าง ๆ รวมถึงทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะเกิดการหดตัวด้านความหนามากกว่าด้านรัศมีเนื่องจากการระเหยของน้ำเกิดในทิศทางความหนามากกว่ารัศมี แต่การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่าทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอากาศร้อน การอบแห้งแบบอากาศร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด การอบ

แห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด การอบแห้งส่วนใหญ่ทำให้เกิดการหดตัวของอาหารซึ่งการหดตัวที่เกิดขึ้นมีรูปแบบที่แตกต่างกันและไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปการสูญเสียน้ำทำให้กล้วยแผ่นหดตัวจากผิวนอกโดยบริเวณขอบของกล้วยแผ่นที่แข็งจะคงสภาพไว้และเว้าลงไปบริเวณรอบ ๆ จุดศูนย์กลางซึ่งเป็นส่วนที่เนื้ออ่อนกว่าตรงขอบ แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการระเหิดของน้ำแข็งที่กระจายทั่วไปอยู่ในเซลของผักผลไม้ จึงน่าจะมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าวิธีอื่น โดยเมื่อสังเกตที่ชิ้นกล้วยจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่ขรุขระ

3) ปริมาตร

ปริมาตร (ซม^3) ของชิ้นกล้วยและข้าวเหนียวถูกวัดก่อนและหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (ร้อยละ) พบว่า ชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิด และข้าวเหนียวมีปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 64.72 และ 69.94 ตามลำดับ ส่วนกล้วยไข่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 18.59 ($p<0.05$) ในขณะที่ จารุวรรณ กุลวิศว (2550) และ Jiang *et al*. (2010) รายงานการหดตัวของปริมาตรของกล้วยหอมแผ่นทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งว่าเกิดการหดตัวลงเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งหรือการอบแห้งด้วยวิธีการอื่น ๆ กล้วยหอมแผ่นทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดการหดตัวของปริมาตรเท่ากับร้อยละ 27.79 (จารุวรรณ กุลวิศว, 2550) ส่วนกล้วยหอมคาเวนดิชแผ่นที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีอัตราส่วนการขยายตัว (expansion ratio = ปริมาตรหลังทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง/ปริมาตรก่อนทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง) เพิ่มขึ้น 1.21 เท่า ถ้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ การทำแห้งกล้วยแบบแช่เยือกแข็งอย่างเดียวจะส่งผลทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นกล้วย (Jiang *et al*., 2010) Krokida and Maroulis (1997) กล่าวว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความหนาของผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงลักษณะ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนา วิธีการและสภาวะที่ใช้ในการทำแห้ง Moreira *et al*. (2000) พบว่าการหดตัวของปริมาตรยังขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ถ้าความชื้นน้อยจะเกิดการหดตัวด้านเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าด้านความหนา ในทางกลับกันถ้าความชื้นสูงการหดตัวด้านความหนาจะเกิดขึ้นเร็วกว่าด้านเส้นผ่าศูนย์กลาง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกล้วยทั้ง 3 ชนิดที่เกิดขึ้นดัง Table 3 เป็นไปได้ว่าน่าจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาดัง Table 2 โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นกล้วยที่เพิ่มมากขึ้นภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นคล้ายเกิดการพองตัว (pufiing) ของชิ้นกล้วย นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมดัง Figure 2 จะมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนภายในมากกว่ากล้วยไข่ซึ่งมีรูพรุนน้อยกว่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของกล้วยไข่ที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมดัง Table 3

Table 3 Volume (cm^3) of banana and sticky rice components of Kao Tom Mud snack before and and freeze drying and volume changes (%)

Component	Volume (cm^3)		Volume changes (%)
	Before	After	
Banana			
Khai	2.6±0.4	3.2±0.3	+18.59^b
Namwa	4.1±0.3	6.8±0.1	+64.72^a
Hom	5.2±0.1	8.8±0.3	+69.94^a
Rice			
Sticky rice	5.7±0.6	6.0±0.5	+6.01

^{ab} Means in the same column within the group (i.e. Banana group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)

4) โครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของกล้วย 3 ชนิด กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงใน Figure 2 โดยรูปทางด้านซ้ายกำลังขยาย 50 เท่า รูปทางด้านขวากำลังขยาย 150 เท่า พบว่า ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า โครงสร้าง

ภายในของกล้วยทั้ง 3 ชนิดจะมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวทั่วไป แต่เมื่อกำลังขยายมากขึ้นเป็น 150 เท่าจะเห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างภายในของกล้วยทั้ง 3 ชนิด ชัดเจนมากขึ้น โดยกล้วยไข่ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กๆ กระจายทั่วบริเวณ รูพรุนมีลักษณะตื้นๆ ไม่ลึก ส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมพบรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยรูพรุนบางส่วนเชื่อมต่อกันทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ลึกลงไปในชิ้นเนื้อ ลักษณะโครงสร้างภายในของกล้วยไข่ที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่า เหมือนกับกล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยการใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งระดับห้องปฏิบัติการรายงานโดย Monteiro *et al*. (2016)

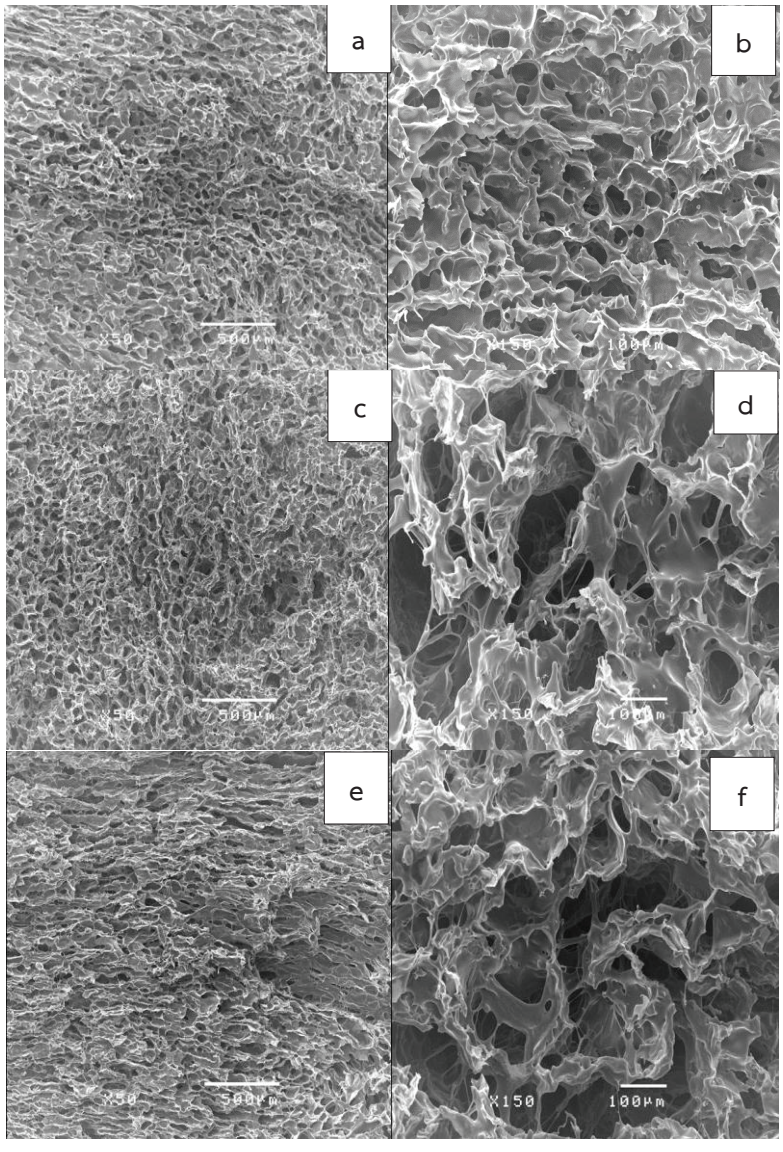


Figure 2 SEM Micrograph of microstructure of freeze-dried banana (a) “Khai” banana (magnification of 35x) ; (b) “Khai” banana (magnification of 150x) ; (c) “Namwa” banana (magnification of 35x) ; (d) “Namwa” banana (magnification of 150x) ; (e) “Hom” banana (magnification of 35x) ; (f) “Hom” banana (magnification of 150x)

ส่วนโครงสร้างภายในของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมที่กำลังขยาย 150 เท่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับกล้วยที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งระดับอุตสาหกรรมและถ่ายภาพที่กำลังขยาย 50 เท่า (Monteiro *et al*., 2016) ความแตกต่างของโครงสร้างภายในกล้วยที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากชนิดของเครื่องทำแห้ง สภาวะการแช่แข็งและการทำแห้ง ชนิดของกล้วย คุณลักษณะทางเคมีกายภาพของกล้วย หรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำแห้ง

ในระหว่างกระบวนการทำแห้งเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารปริมาณของเหลวภายในโครงสร้างจะค่อยๆ ลดลงทำให้เกิดแรงดันคาพิลลารีซึ่งทำให้เกิดความเครียดใน

ส่วนของวัสดุที่เป็นของแข็ง (solid matrix) ซึ่งจะอัดและเปลี่ยนรูปร่างเซล ทำให้เกิดการเหี่ยวย่นและหดตัว อย่างไรก็ตามการทำแห้งบางวิธีเช่น microwave multi-flash drying process ที่ในกระบวนการมีการระเหยของน้ำออกอย่างรวดเร็วในสภาวะสุญญากาศเป็นช่วง ๆ ทำให้เกิดการขยายตัวของก๊าซและทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นลดลง และการหดตัวของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นไม่มากนัก ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่มานี้เกิดขึ้นกับกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมในการทดลองครั้งนี้ดังแสดงใน Figure 2 ที่พบโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ Monteiro *et al*. (2016) ได้รายงานค่าความหนาแน่น (apparent density) ของกล้วยทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง 2 ชนิดคือ เครื่องทำแห้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมไว้ว่ามีค่าเท่ากับ 0.679 และ 0.495 กรัม/ซม^3 ตามลำดับ ในขณะที่กล้วยสดที่มีความหนาแน่น 1.04 กรัม/ซม^3 นอกจากนี้ยังได้รายงานความเป็นรูพรุนของกล้วยทำแห้งโดยเครื่องทำแห้งระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมเท่ากับร้อยละ 51.2 และ 66.1 เปรียบเทียบกับกล้วยสดที่มีความเป็นรูพรุนเพียงร้อยละ 11.6

5) เนื้อสัมผัส

จากการวัดค่าความแน่นเนื้อของกล้วยสดก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า กล้วยน้ำว้ามีความแน่นเนื้อมากที่สุดเท่ากับ 90.56 กรัม ($p<0.05$) ส่วนกล้วยไข่และกล้วยหอมมีความแน่นเนื้อเท่ากับ 39.55 และ 39.03 กรัม ($p>0.05$) เนื่องจากกล้วยน้ำว้ามีลักษณะเนื้อที่ค่อนข้างแน่น เหนียว ส่วนกล้วยไข่และกล้วยหอมมีเนื้อสัมผัสที่มีความนุ่ม แน่นแต่น้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ความแน่นเนื้อที่แตกต่างกันน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณแป้งและสารประกอบเพกตินของกล้วย กล้วยน้ำว้าในระยะสุกมีปริมาณแป้งเท่ากับร้อยละ 3.9 มากกว่ากล้วยหอมและกล้วยไข่ที่มีปริมาณแป้งร้อยละ 1.4 และ 0.9 ตามลำดับ (พรฤดี ศรีปทุมรักษ์, 2547) ภายหลังจากนำชิ้นกล้วยทั้ง 3 ชนิดไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแล้ววัดความแข็ง/ความกรอบ พบว่ากล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีความแข็งมากกว่ากล้วยหอม ($p<0.05$) โดยแรงที่ใช้ในการกดให้ชิ้นกล้วยเกิดการแตกออกมีค่ามากกว่ากล้วยหอม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ากล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความกรอบน้อยกว่ากล้วยหอมที่ใช้แรงในการกดให้แตกออกน้อยกว่าดัง Table 4

สมบัติทางโครงสร้างเช่น ความหนาแน่น และความเป็นรูพรุนมีผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณภาพของอาหารอบแห้ง Scaman *et al*. (2014) กล่าวว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นความกรอบเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีรูพรุนที่เกิดจากโพรงอากาศล้อมรอบด้วยโครงสร้างที่มีความเปราะบางแตกหักง่าย ซึ่งจากโครงสร้างภายใน SEM ของกล้วยทั้ง 3 ชนิดดัง Figure 2 จะพบว่า ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน จึงทำให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความกรอบ ความกรอบของกล้วยภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดัง Table 3 กล้วยหอมที่มีความกรอบมากที่สุดหรือความแข็งน้อยที่สุด 358.13 กรัม พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่สูงเช่นกันร้อยละ 69.94 กล้วยไข่ที่มีความกรอบน้อยที่สุดหรือความแข็งมากที่สุด 524.49 กรัม พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีค่าต่ำที่สุดร้อยละ18.59 ส่วนกล้วยน้ำว้ามีความกรอบไม่แตกต่างจากกล้วยไข่ ($p>0.05$) แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรแตกต่างจากกล้วยไข่อย่างชัดเจนนั้น (ร้อยละ 64.72 VS. 18.59) ส่วนหนึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าสดที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งความแน่นเนื้อของกล้วยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี เช่น แป้ง และคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ ที่พบในผนังเซลล์ เช่น สารประกอบเพกติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส (พรฤดี ศรีปทุมรักษ์, 2547 ; จริงแท้ ศิริพานิช, 2549)

ส่วนข้าวเหนียวพบว่ามีค่าความแข็งเท่ากับ 6005.40 กรัม มากกว่ากล้วยประมาณ 10 เท่าอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของรูปร่างลักษณะที่กล้วยมีลักษณะเป็นชิ้นแผ่นบางๆ หนาประมาณ 3.8-4.5 มม. ส่วนข้าวเหนียวมีความหนา 6.9 มม. ประกอบด้วยเมล็ดข้าวที่ทับซ้อนกันหลายชั้น และเมื่อแป้งเกิดการรีโทรเกรเดชั่นอาจมีผลทำให้มีความแข็งมากกว่า นอกจากนี้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งมีส่วนประกอบทั้งชิ้นกล้วยและข้าวเหนียว พบว่า ผลิตภัณฑ์มีความแข็งมากขึ้นกว่าส่วนของส่วนประกอบที่เป็นชิ้นกล้วยและส่วนข้าวเหนียวดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทั้งชิ้นมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 11,656.26-15,189.87 กรัม ($p>0.05$) ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ฟรีสดรายที่มีข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบที่คล้ายกันกับข้าวต้มมัดคือ ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสดราย มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 250.81-287.42 นิวตัน หรือ 25,575.09-29,308.22 กรัม (สณฑกานต์ คุณเอนก และคณะ, 2565)

Table 4 Firmness and hardness of Freeze-dried Kao Tom Mud snack and its components

Component	Firmness (g force)	Hardness (g force)
	Before	After
Banana		
Khai	39.55±5.85[b]	524.49±88.90[a]
Namwa	90.56±11.10[a]	507.13±137.95[ab]
Hom	39.03±4.09[b]	358.13±98.52[c]
Rice		
Sticky rice	NA	6005.40±1978.54
Kao Tom Mud snack		
Khai	NA	12571.61±3258.15[ns]
Namwa	NA	15189.87±1591.94
Hom	NA	11656.26±1303.58

[ab] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)

[ns] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p>0.05$)

คุณภาพทางเคมี

1) ค่าความชื้นและ a_w

การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกล้วย ข้าวเหนียว และผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดเกิดการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ถูกระเหิดออกในขั้นตอนการทำแห้ง โดยกล้วยก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 71.46-76.89 ($p<0.05$) ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งความชื้นลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 2.18-2.72 ($p<0.05$) ลดลงประมาณร้อยละ 96.2-96.5 ข้าวเหนียวมีความชื้นก่อนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเท่ากับร้อยละ 34.50 หลังการทำแห้งความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 1.48 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 95.7 ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดก่อนการทำแห้งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 47.60-49.68 ($p>0.05$) หลังการทำแห้งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 2.35-2.37 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 95.1-95.2

จะเห็นได้ว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งในการศึกษาครั้งนี้มีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลงประมาณร้อยละ 95-96 โดยทั่วไปการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงพบข้อมูลความชื้นที่แตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 0.5 (แอปเปิ้ล) ร้อยละ 2.09 (ข้าว) ร้อยละ 5 (ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสดราย) จนถึงร้อยละ 9.87 (แก้วมังกร) (สณฑกานต์ คุณเอนก และคณะ, 2565 ; Nowak & Jakubczyk, 2020)

นอกจากนี้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งยังมีผลทำให้ค่า a_w ลดลงเช่นกันโดยค่า a_w ของกล้วยลดลงอยู่ในช่วง 0.173-0.197 ($p>0.05$) ค่า a_w ของข้าวเหนียวเท่ากับ 0.422 และค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.169-0.181 ($p>0.05$; Table 5) Morega *et al*. (2011) พบว่า เมื่อค่า a_w ของกล้วยคาเวนดิชที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสูงกว่า 0.43 สังเกตพบการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้นชัดเจน

ค่า critical a_W ของกล้วยคาเวนดิชทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.23- 0.26 เพื่อป้องกันไม่ให้สมบัติเชิงแสง ได้แก่ สี และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจเกิดขึ้นคือ เกิดการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) กลายเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery state) หรือที่เรียกว่า glass transition ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ทำให้ความกรอบของผลิตภัณฑ์ลดลง

Table 5 Water activity (a_w) and moisture content (%) of Kao Tom Mud snack and its components before and after freeze drying

Component	Moisture content (%)		a_w	
	Before	After	Before	After
Banana				
Khai	71.46±0.71[b]	2.72±0.02[a]	0.978±0.002[ab]	0.197±0.009[ns]
Hom	76.78±0.86[a]	2.18±0.13[c]	0.976±0.002[b]	0.173±0.013
Namwa	76.89±0.37[a]	2.43±0.10[b]	0.980±0.001[a]	0.193±0.018
Rice				
Sticky rice	34.50±1.16	1.48±0.07	0.941±0.002	0.422±0.004
Kao Tom Mud Snack				
Khai	47.60±0.43[ns]	2.35±0.13[ns]	0.965±0.001[c]	0.173±0.022[ns]
Namwa	49.68±1.89	2.40±0.03	0.968±0.001[b]	0.181±0.033
Hom	48.68±0.31	2.37±0.09	0.973±0.001[a]	0.169±0.001

[ab] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)

[ns] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p>0.05$)

Table 6 pH of Kao Tom Mud snack and its components before and after freeze drying

Component	pH		Brix
	Before	After	
Banana			
Khai	4.94±0.01[b]	5.32±0.01[a]	28.80±0.2[a]
Namwa	4.63±0.02[b]	4.82±0.03[c]	28.10±0.1[b]
Hom	4.92±0.02[a]	4.91±0.02[b]	23.13±0.1[c]
Rice			
Sticky rice	6.07±0.01	6.36±0.13	NA
Kao Tom Mud snack			
Khai	5.31±0.01[b]	5.41±0.01[a]	NA
Namwa	5.11±0.01[c]	5.12±0.04[b]	NA
Hom	5.35±0.01[a]	5.15±0.02[b]	NA

[ab] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) with different letters are statistically different ($p<0.05$)

[ns] Means in the same column within the group (i.e. Banana or Kao Tom Mud snack group) are not statistically different ($p>0.05$)

2) ค่า pH และ Brix

ค่า pH ของกล้วยสดทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 4.63-4.94 pH ข้าวเหนียวเท่ากับ 6.07 และ pH ของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วย 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 5.11-5.31 ภายหลังการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่า ทั้งหมดมีค่า pH แนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Table 6) ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของกล้วยเรียงลำดับดังนี้ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอม ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใช้วัดค่าความหวานของกล้วยมีองค์ประกอบของน้ำตาลหลัก 3 ชนิดคือ น้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส แปรผันตามระยะการสุก (จริงแท้ ศิริพานิช, 2549) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กล้วยไข่ในระยะสุกที่ทั้งผลมีสีเหลืองโดยกล้วยไข่จัดอยู่ในระยะสุกที่ 5 กล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมอยู่ระยะสุกที่ 6

คุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วย 3 ชนิด กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอม พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่น้อยกว่าที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมในทุกคุณลักษณะได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความกรอบ และความชอบรวม ($p<0.05$; Figure 3) เนื่องจากลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยไข่ในส่วนของชิ้นกล้วยที่อยู่ด้านบนของผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม จึงทำให้ส่วนของข้าวเหนียวด้านล่างปรากฏต่อสายตามากกว่า ต่างจากที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมที่ขนาดของชิ้นกล้วยจะใกล้เคียงกับชิ้นข้าวเหนียวด้านล่าง อีกทั้งชิ้นกล้วยไข่ยังมีลักษณะแบนส่วนกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมจะดูมีความพองมากกว่า จึงมีผลทำให้คะแนนการยอมรับของข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่น้อยกว่าที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม ($p<0.05$)

นอกจากนี้คุณลักษณะทางด้านสี พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมมีสีขาวเหลืองสว่างกว่า ในขณะที่ส่วนที่ทำจากกล้วยไข่จะมีสีเหลืองอ่อนและส่วนใหญ่ปรากฏเป็นเส้นสีดำๆ กระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของเนื้อกล้วย (Figure 1) ทำให้ดูไม่น่ารับประทาน ทำให้คะแนนการยอมรับข้าววต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยไข่ต่ำกว่าที่ทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้า ($p<0.05$)

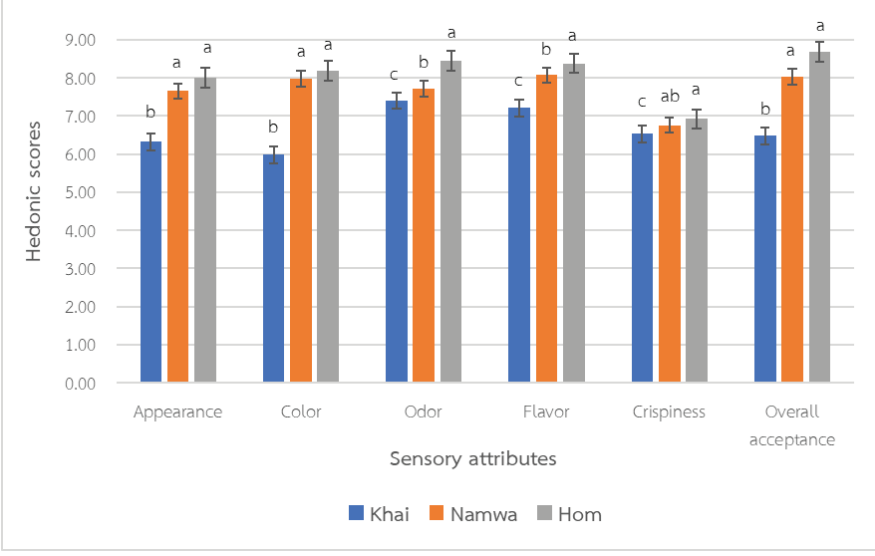


Figure 3 Sensory acceptance scores of Khai, Namwa, and Hom banana freeze-dried Kao Tom Mud snack. Different letters (above each bar) indicate a significant difference between mean of each sample ($p<0.05$).

คุณลักษณะทางด้านกลิ่นรส พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยหอมได้คะแนนการยอมรับด้านรสชาติมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ ($p<0.05$) ผู้ทดสอบให้ข้อมูลว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยหอมมีกลิ่นกล้วยมากกว่าข้าวต้มมัดที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ จากการศึกษาสารให้กลิ่นในกล้วยของ ภาสวัน คูหา (2560) พบว่า สารให้กลิ่นในกล้วยหอมทองมีจำนวน 23 สาร ส่วนกล้วยน้ำว้ามีสารให้กลิ่น 5 สาร ส่วนในกล้วยไข่ไม่พบข้อมูล สอดคล้องกับ สมฤดี ไทพาณิชย์ (2550) พบว่าในกล้วยหอมมีสารให้กลิ่นที่ระเหยได้จำนวน 17 ชนิด โดยชนิดของสารให้กลิ่นจะแตกต่างกันไปตามระยะการสุก สารประกอบที่ระเหยได้ในกล้วยทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบวิธีอื่นเช่น วิธี vacuum belt drying และการทำแห้งแบบใช้ลมร้อน (air drying) โดยสารประกอบที่ระเหยได้ของผักและผลไม้ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะถูกกักเก็บไว้ในบริเวณเล็กๆ (microregion) จะเกิดการสูญหายไปเมื่อผักและผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งแล้วเกิดการดูดซับน้ำหรือความชื้นซึ่งทำให้การซึมผ่านหรือแพร่ผ่านบริเวณส่วนแห้งนั้นเพิ่มขึ้น Wang *et al*. (2007) นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดมีรสชาติหวานแต่ที่ทำจากกล้วยไข่จะมีความฝาดเปรี้ยว และมีความขมเล็กน้อย ภายหลังการกลืน ค่า pH ของผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 5.12-5.41 (Table 6)

คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ข้าวต้มมัดทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิดได้รับคะแนน

การยอมรับแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) ข้าวต้มมัดแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าได้คะแนนเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันและมากกว่ากล้วยไข่ ค่าคะแนนการยอมรับใกล้เคียงกันสัมพันธ์กับค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Table 4) พบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ทำจากกล้วยทั้ง 3 ชนิด มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ด้านความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์พบว่า ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ทำจากกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมได้คะแนนการยอมรับด้านความชอบรวมสูงกว่ากล้วยไข่ ($p<0.05$) โดยมีคะแนนการยอมรับเท่ากับ 8.02 และ 8.68 ซึ่งมากกว่ากล้วยไข่ที่มีคะแนนการยอมรับรวมเท่ากับ 6.48 คะแนน

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดให้อยู่ในรูปแบบข้าวต้มมัดขบเคี้ยวโดยการใช้การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลต่อคุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ทำจากกล้วย 3 ชนิดคือ กล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม โดยพบว่า การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีผลทำลายสีเหลือง (ค่า *b**) ของกล้วยมากกว่าค่า *L** และค่า *a** สีของกล้วยมีสีเหลืองซีดลง ปริมาตรของส่วนชิ้นกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมเพิ่มขึ้นเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างภายในของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมจะพบรูพรุนขนาดใหญ่กว่าของกล้วยไข่ ซึ่งส่งอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสของชิ้นกล้วย หากวัดเฉพาะชิ้นกล้วยพบว่ากล้วยหอมมีความแข็งมากกว่ากล้วยน้ำว้าและกล้วยไข่ แต่ความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื้อสัมผัสจะมีความแน่นแข็งเป็นผลมาจากส่วนของข้าวเหนียวที่อยู่ด้านล่าง ผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดขบเคี้ยวที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำร้อยละ 2.35-2.40 และค่า a_w ต่ำ 0.169-0.181 จากการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับโดยรวมผลิตภัณฑ์ข้าวต้มมัดทำจากกล้วยหอมและกล้วยน้ำว้าสูงกว่ากล้วยไข่ ($p>0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะการจัดการธุรกิจอาหาร สถาบันปัญญาภิวัฒน์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

จริงแท้ ศิริพานิช. (2549). *สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้* (พิมพ์ครั้งที่ 6). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จารุวรรณ กุลวิศว. (2550). ผลของวิธีการอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต* สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จินดา ศรศรีวิชัย. (2541). การใช้คอมพิวเตอร์โมเดลเพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไข่ในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ (ระยะที่ 1): รายงานโครงการวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทีเอ็นเอ็นออนไลน์. (2566, 12 กรกฎาคม). กล้วยหอมไทย ผลไม้ยืนหนึ่ง ราคาสูง ผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญที่มียอดการส่งออกมากเป็นลำดับต้นๆ. https://www.tnnthailand.com/news/infographic/150930/

เบญจมาศ ศิลาย้อย. (2538). *กล้วย* (พิมพ์ครั้งที่ 2). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรฤดี ศรีปทุมรักษ์. (2547). ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลกับค่าดัชนีน้ำตาลของผลไม้ไทย. *วิทยานิพนธ์เภสัชศาสตร์มหาบัณฑิต* สาขาอาหารเคมีและโภชนศาสตร์ทางการแพทย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาสวัน คูหา. (2560). การเปรียบเทียบสารให้กลิ่นจากกล้วยสายพันธุ์ต่างๆ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สณฑกานต์ คุณเอนก, วันวิสาข์ โพธิ์ใหญ่, วิรัญชนา ฤทธิบุตร, วริศชนม์ นิลนนท์ และเกสริน, ถังเงิน. (2565). การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งและความหวานของทุเรียนหมอนทองในช่วงระยะเวลาการบ่มสุก และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวมูนทุเรียนฟรีสดราย. *รายงานผลโครงงานการปฏิบัติสหกิจศึกษา* สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

สมฤดี ไทพาณิชย์. (2550). กระบวนการทางเอนไซม์สำหรับแปรรูปไซรัปกล้วยหอม Musa acuminata AAA group “Gros Michel” เพื่อเป็นอาหารที่มีหน้าที่เฉพาะ. *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต* สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ. (2566, 1 กรกฎาคม). โอกาสกล้วยไทยสู่อินเตอร์. https://www.ditp.go.th/post/132425

AOAC. (2000). *Official method of analysis* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.

Bhatta, S., Janezic, T.S., & Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant-based food. *Foods, 9*(1), 87. https://doi.org/10.3390/foods9010087

CSIRO. (1972). *Banana ripening guide*. Volume 8 of Division of Food Research Circular. Commonwealth Scientific Institute and Research Organization.

Jiang, H., Zhang, M., & Mujumdar, A.S. (2010). Physico-chemical changes during different stages of MFD/FD banana chips. *Journal of Food Engineering, 10*(2), 140-145. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.06.002

Krokida, M.K., Karathenos, V.T., & Maroulis, Z.B. (1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering, 35*, 369-380.

Krokida, M.K., & Maroulis, Z.B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology, 15*, 2441-2458. https://doi.org/10.1080/07373939708917369

Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., & Saravacos, G.D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated product. *International Journal of Food Science and Technology, 36*, 53-59. https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x

Milani, A., Jouki, M., & Rabbani, M. (2020). Production and characterization of freeze-dried banana slices pretreated with ascorbic acid and quince seed mucilage: physical and functional properties. *Food Science and Nutrition, 8*, 3768-3776. https://doi.org/10.1002/fsn3.1666

Monteiro, R., Carciofi, B.A.M., & Laurindo, J.B. (2016). A microwave multi-flash drying process for producing crispy banana. *Journal of Food Engineering, 178*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.12.024

Morega, G., Talens, P., Morega, M.J., & Martinez-Narvarete, N. (2011). Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *Journal of Food Engineering, 106*, 212-219. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.009

Moreira, R., Figueireidi, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology, 18*(1-2), 279-294. https://doi.org/10.1080/07373930008917704

Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The freeze-drying of foods—the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials. *Foods, 9*(10), 1488. https://doi.org/10.3390/foods9101488

Oikonomopoulou, V.P., Krokida, M.K., & Karathanos, V.T. (2011). The influence of freeze-drying conditions on microstructural changes of food product. *Procedia Food Science, 1*, 647-654. https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.097

Serna-Cock, L., Vargas-Munoz, D.P., & Aponte, A.A. (2015). Structural, physical, functional and nutraceutical changes of freeze-dried fruit. *African Journal of Biotechnology, 14*(6), 442-450. https://doi.org/10.5897/AJB2014.14189

Scaman, C.H., Durance, T.D., Drummond, L., & Sun, D.-W. (2014). Combined microwave vacuum drying. In D.-W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 1-18). Academic Press.

Shukla, S. (2011). Freeze drying process: A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 2*(12), 3061-3068.

Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R., & Soponronnarit, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 29*(3), 809-816.

Valentina, V., Pratiwi, A.R., Hsiso, P.Y., Tseng, H.T., Hsieh, J.F., & Chen, C.C. (2016). Sensorial characterization of foods before and after freeze-drying. *Austin Food Science, 1*(6), 1-5.

Wang, J., Li, Y.Z., Chen, R.R., Bao, J.Y., & Yang, G.M. (2007). Comparison of volatile of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze drying, and air drying. *Food Chemistry, 104*(4), 1516-1521. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.02.029

แคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานของปลาไหลนา (*Monopterus albus*) ด้วยการย้อมแถบสีโครโมโซมแบบธรรมดาและแบบนอร์

Standardized karyotype and idiogram of swamp eel (*Monopterus albus*) by conventional staining and Ag-NOR banding techniques

นันทิญา มณีโชติ[1], วัจนารัตน์ ควรดี[1], ชวนพิศ จารัตน์[1], ศรัณย์ จำรัสธนสาร[2], สราวุธ แก้วศรี[2], กฤษณ์ ปิ่นทอง[3] และ นิชาภา เฉตระการ[1*]

Nuntiya Maneechot[1], Watjanarat Kuandee[1], Chuanpit Jarat[1], Sarun Jumrasthanasan[2], Sarawut Kaewsri[2], Krit Pinthong[3] and Nichapa Chetrakan[1*]

Received: 6 December 2023 ; **Revised**: 23 April 2024 ; **Accepted**: 17 May 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการรายงานการศึกษาแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานของปลาไหลนา (*Monopterus albus*) ที่พบในอำเภอชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ ในวงศ์ปลาไหล ซึ่งเป็นปลาท้องถิ่นที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของไทย โดยได้รวบรวมตัวอย่างจำนวน 10 ตัว (เพศผู้ 5 ตัว และเพศเมีย 5 ตัว) เตรียมโครโมโซมระยะเมทาเฟสจากเนื้อเยื่อไต ย้อมสีโครโมโซมด้วยการย้อมแถบสีแบบธรรมดาและแบบนอร์ ผลการศึกษาพบว่า ปลาไหลนามีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์ (2*n*) เท่ากับ 24 แท่ง เป็นชนิดเทโลเซนทริกทั้งหมด มีจำนวนโครโมโซมพื้นฐาน (NF) เท่ากับ 24 ทั้งในเพศผู้และเพศเมีย แคริโอไทป์ประกอบด้วยชนิดเทโลเซนทริกขนาดใหญ่ 8 แท่ง ขนาดกลาง 14 แท่ง และขนาดเล็ก 2 แท่ง การศึกษาครั้งนี้เป็นการรายงานครั้งแรกที่พบตำแหน่งนอร์ 1 ตำแหน่ง (ภาวะพหุสัณฐาน) ในปลาชนิดนี้ บนโครโมโซมคู่ที่ 3 (3a3b) ทั้งในเพศผู้และเพศเมีย สามารถเขียนสูตรแคริโอไทป์ได้ดังนี้ $2n\ (24) = L^{t}_{8} + M^{t}_{14} + S^{t}_{2}$

คำสำคัญ: แคริโอไทป์, อิดิโอแกรม, ปลาไหลนา, ย้อมสีแบบธรรมดา, ย้อมแถบสีแบบนอร์

Abstract

The karyotype and idiogram of swamp eel (*Monopterus albus*) found in Chumphonburi district, Surin Province, belongs to the family Synbranchidae. It is a local fish species that is of economic importance in Thailand. Ten specimens (5 males and 5 females) were collected. The metaphase chromosomes were directly prepared from the kidney tissues and were stained using conventional staining and Ag-NOR banding techniques. The results showed that diploid number (2*n*) of the *M. albus* was 24 chromosomes, all of which telocentric chromosomes. The fundamental number (NF) was 24 in both sexes and the karyotype was composed of 8 large, 14 medium, and 2 small telocentric chromosomes. This is the first report of polymorphism of NORs in *M. albus*, with pair 3 (3a3b) that showed one position of a clearly observable satellite chromosome in both males and females. The karyotype formula for *M. albus* is as follows: $2n\ (24) = L^{t}_{8} + M^{t}_{14} + S^{t}_{2}$

Keywords: Karyotype, Idiogram, *Monopterus albus*, Conventional straining, Ag-NOR banding

---

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ตำบลนอกเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

[2] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ถนนจิระ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000

[3] คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยาหันตรา ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

[1] Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Nok Mueang Subdistrict, Mueang Surin District, Surin Province 32000

[2] Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Jira Road, Mueang District, Buriram Province 31000

[3] Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamanala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra Subdistrict, Phra Nakhon Si Ayutthaya District, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province 13000

* Corresponding Author E-mail: nichapa.ch@srru.ac.th

บทนำ

ปลาในวงศ์ Synbranchidae มีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ ปลาไหลนา [*Monopterus albus*, Zuiew (1973)] มีชื่อสามัญ swamp eel, Asian swamp eel ปลาหลาด [*Ophisternon bengalense*, Mcclelland (1845)] มีชื่อสามัญ Bengal eel และปลาไหลแดงหรือปลาหล่อย [*Macrotrema caligans*, Cantor (1849)] ประเทศไทยพบปลาไหลนาทั่วทุกภาค เป็นปลาประจำถิ่น (native species) ที่พบได้ในเขตร้อน (tropical area) พบกระจายอย่างกว้างขวางตามประเทศต่าง ๆ เช่น อินเดีย จีน ญี่ปุ่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย และบังคลาเทศ (Talwar & Jhingran, 1992 ; Froese & Pauly, 2010 ; Guan *et al*., 1996) มักอาศัยตามพื้นดินโคลนที่มีซากพืชและซากสัตว์เน่าเปื่อยสะสมอยู่ หรือบริเวณที่ปกคลุมด้วยวัชพืช (วิรัช จิ๋วแหยม, 2551) อำเภอ ชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ เป็นแหล่งที่พบปลาไหลในสภาพแวดล้อมทั่วไปและในแหล่งน้ำธรรมชาติ (นิชาภา เฉตระการ และคณะ, 2564 ; นันทิญา มณีโชติ และคณะ, 2563) ลักษณะทั่วไปของปลาไหลนาแสดงดัง Figure 1 ลักษณะลำตัวกลมยาวคล้ายงู ส่วนหางแบนทางด้านข้างเรียวและสั้นกว่าส่วนที่เป็นลำตัว ไม่มีเกล็ด ริมฝีปากบนหนาคลุมริมฝีปากล่าง ตาค่อนข้างเล็ก มีหนังคลุม (Nichols, 1943 ; Jayaram, 1981 ; Talwar & Jhingran, 1992 ; Kottelat, 1998) ด้านบนลำตัวมีสีน้ำตาล ส่วนด้านล่างมีสีน้ำตาลอ่อนหรือขาวมีจุดดำเล็กๆ ด้านข้างลำตัว บางครั้งพบด้านล่างของลำตัว (Inger & Kong, 1962) สามารถหายใจโดยใช้แก๊สออกซิเจนจากอากาศได้โดยตรง (Nelson, 1994) นอกจากนั้นยังพบทางตะวันตกของแอฟริกา อเมริกากลาง และอเมริกาใต้ (Nelson, 1994 ; Collins *et al*., 2002) ซึ่งประชากรในแถบนี้ถือว่าปลาไหลเป็นอาหารที่ให้โปรตีนหลักรวมทั้งให้รสชาติที่ดี สำหรับประเทศไทยปลาไหลนาเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ให้โปรตีนสูง และมีไขมันต่ำ(Muslimatun *et al*., 2018) มีราคาแพง เป็นที่นิยมบริโภคของคนไทยและมีแนวโน้มที่ดีสำหรับการส่งออก (สุวรรณดี ขวัญเมือง, 2533 ; วิรัช จิ๋วแหยม และคณะ, 2547) และสามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชน

การศึกษาทางด้านพันธุศาสตร์ระดับเซลล์ของปลาไหลนายังมีน้อยมาก จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีความแปรผันของจำนวนโครโมโซมสูง (Supiwong *et al*., 2019 ; ภาณุพณ ถวิลประวัติ, 2556 ; ธวัช ดอนสกุล และวิเชียร มากตุ่น, 2539) ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานของปลาไหลนาทั้งการย้อมสีแบบธรรมดาและแถบสีแบบนอร์ ซึ่งการย้อมสีแบบธรรมดาสามารถบอกจำนวนและชนิดของโครโมโซมประจำสิ่งมีชีวิตนั้นๆ ได้และอาจบอกลักษณะบางอย่างของโครโมโซม เช่น รอยคอดที่ 1 หรือ รอยคอดที่ 2 เป็นต้น และการย้อมแถบสีแบบนอร์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจหา NORs ซึ่งในสัตว์มีกระดูกสันหลังมียีนสำหรับสังเคราะห์ไรโบโซมอลอาร์เอ็นเอ (ribosomal RNA) ชนิด 18S และ 28S อยู่ ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านพันธุศาสตร์ขั้นสูงและความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของปลาไหลนาที่พบในวงศ์ Synbranchidae ในจังหวัดสุรินทร์ ประเทศไทย นอกจากนี้ยังเป็นการรายงานครั้งแรกที่พบตำแหน่งนอร์ที่มีลักษณะภาวะพหุสัณฐาน (polymorphism) ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อพัฒนาการปรับปรุงพันธุ์ การผสมข้ามพันธุ์และการอนุรักษ์พันธุ์ เป็นต้น (อลงกลด แทนออมทอง, 2554) เพื่อให้ได้ลักษณะพันธุ์ที่ดีตามความต้องการและเป็นประโยชน์ให้กับกลุ่มเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงปลาไหลนาและผู้ที่สนใจต่อไป

วิธีการศึกษา

การรวบรวมตัวอย่าง

รวบรวมตัวอย่างปลาไหลนาจากตำบลศรีณรงค์ อำเภอชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ นำมาเลี้ยงในห้องปฏิบัติการก่อนทดลอง 7 วัน โดยใช้ตัวอย่างปลาเพศผู้ 5 ตัว (ขนาดความยาวลำตัวเฉลี่ย 55-60 เซนติเมตร) และเพศเมีย 5 ตัว (ขนาดความยาวลำตัว เฉลี่ย 35-50 เซนติเมตร) โดยจะสังเกตจากลักษณะรูปร่างร่วมด้วย โดยในปลาไหลเพศผู้จะมีลำตัวยาวเรียวสีเข้มกว่าเพศเมีย ส่วนเพศเมียจะมีลักษณะลำตัวอวบอ้วน และความยาวลำตัวสั้น และนอกจากนั้นปลาไหลนายังมีลักษณะอวัยวะเพศแตกต่างกัน โดยเพศผู้จะมีลักษณะอวัยวะเพศเว้า มีสีซีด Figure 2 (A) และเพศเมียจะมีลักษณะนูนมีสีแดงเรื่อ Figure 2 (B) จากนั้นนำตัวอย่างปลาไหลมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

Figure 1 Characteristics of the swamp eel (*Monopterus albus*).

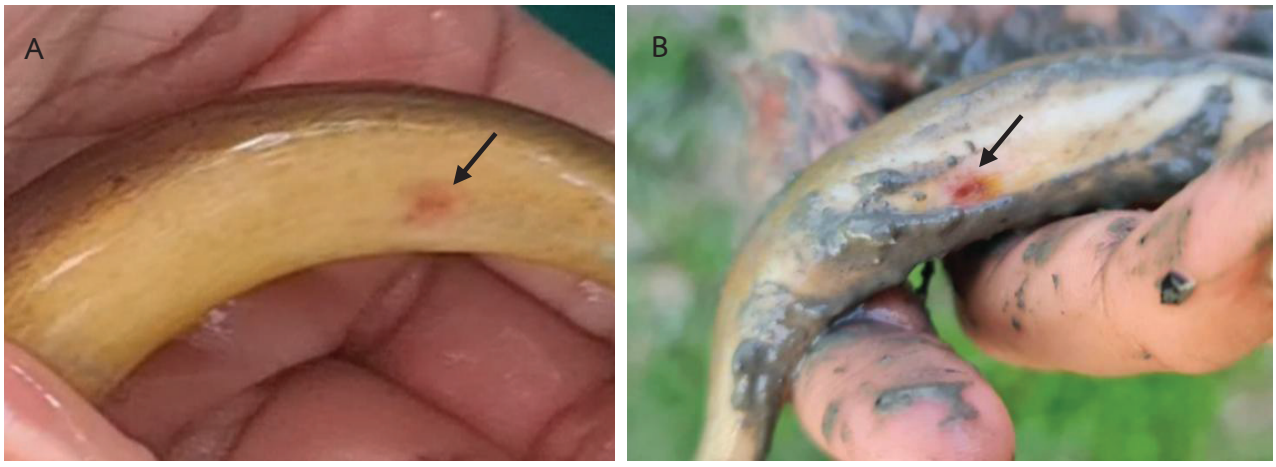


Figure 2 Swamp eel (*Monopterus albus*) breeding parents that have perfect sexual characteristics male (A) and female (B), arrows indicate sexual characteristics.

งานวิจัยนี้ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในสัตว์ทดลอง มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ เลขที่ AE651004 วันที่ 15 ธันวาคม 2565

การเตรียมโครโมโซมจากไต (วิธีการเตรียมดัดแปลงจากวิธีของ Chen & Ebeling (1968)

เตรียมสารละลายโคลชิซิน (colchicine) ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 ฉีดเข้าบริเวณช่องท้องของปลา ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อ 100 กรัมน้ำหนักตัว ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง นำมาทำการ การุณยฆาต (AVMA, 2020) และผ่าตัดเพื่อเก็บเอาส่วนไต นำไปบดขยี้ให้ละเอียดในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.075 โมลาร์ จากนั้นย้ายตัวอย่างเซลล์ไตลงในหลอดปั่นเหวี่ยง (centrifuge tube) ขนาด 15 มิลลิลิตร บ่มไว้เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เตรียมโครโมโซมด้วยเทคนิค ไฮโพโทนิคฟิกเซชัน-แอร์-ดรายอิ้ง (hypotonic-fixation-air-drying) ตามวิธีของศรันย์ จำรัสธนสาร และประวีรณ์ สุพรรณอ่วม (2561) โดยหยดสารละลายเซลล์แขวนลอยลงบนสไลด์ที่สะอาด ปล่อยสไลด์ให้แห้งในอากาศ

การย้อมสีโครโมโซม

สไลด์ที่หยดสารละลายเซลล์แล้วปล่อยให้แห้ง นำมาย้อมด้วยสีจิมซ่าความเข้มข้น ร้อยละ 20 โดยเตรียมจาก stock giemsa's solution ใน Sorensen buffer pH 6.8 นาน 30 นาที จากนั้นล้างสีส่วนเกินออกด้วยน้ำประปาให้สะอาด ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปตรวจสอบโครโมโซมภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า สำหรับการย้อมแถบสีแบบนอร์ ดัดแปลงจากวิธีของ Howell & Black (1980) โดยอบสไลด์ที่ 60 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 3 วัน จากนั้นหยดซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) ร้อยละ 50 และหยดเจลลาติน (Gelatin) ร้อยละ 4 ปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ นำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที (หรือจนกว่าสไลด์จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม) ล้างด้วยน้ำกลั่น ผึ่งสไลด์ให้แห้งแล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การจัดทำแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐาน

จัดทำแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐาน จากเซลล์ระยะเมทาเฟส (metaphase) นำภาพที่ได้มาจับคู่โครโมโซมที่เหมือนกัน พร้อมทั้งวัดค่าต่าง ๆ ของโครโมโซม ได้แก่ ความยาวของแขนโครโมโซมข้างสั้น (short arm ; Ls) ความยาวของแขนโครโมโซมข้างยาว (long arm ; LI) และคำนวณหาความยาวของโครโมโซมแต่ละแท่ง (total length ; LT, LT = LI+Ls) จากนั้นคำนวณหาค่าความยาวสัมพัทธ์ของโครโมโซม (relative length ; RL, RL = LT/ΣLT) ค่า centromeric index (CI, CI = LT/LI) นำค่า RL และ CI มาหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) เพื่อระบุขนาด (size) และชนิดของโครโมโซม (type of chromosome) นำค่าที่หาได้ทั้งหมดไปใช้ประกอบในการจัดทำแคริโอไทป์และสร้างอิดิโอแกรมมาตรฐานต่อไป และหาสูตรแคริโอไทป์ ตามวิธีของ Turpin & Lejeune,1965 ; กันยารัตน์ ไชยสุต (2532) และอลงกลด แทนออมทอง (2554) กำหนดชนิดของโครโมโซมเป็น เมทาเซนทริก (metacentric, m), ซับเมทาเซน ทริก (submetacentric, sm), อะโครเซนทริก (acrocentric, a) และเทโลเซนทริก (telocentric, t) ส่วนขนาดโครโมโซม กำหนดโครโมโซมขนาดใหญ่ (large, L), โครโมโซมขนาดกลาง (medium, M) และโครโมโซมขนาดเล็ก (small, S) จัดเรียงแคริโอไทป์ตามความยาวของโครโมโซมแต่ละคู่จากมากไปหาน้อย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์โฟโต้ชอป (photoshop) ใส่หมายเลขของโครโมโซมแต่ละคู่ไว้ด้านล่าง และจัดทำอิดิโอแกรม โดยใช้เซลล์ระยะเมทาเฟสจากการย้อมสีโครโมโซมแบบธรรมดาอย่างละ 30 เซลล์ มาจัดแคริโอไทป์ วัดความยาว

ของแขนโครโมโซมทุกคู่ด้วยไม้บรรทัดเวอร์เนียร์ (vernier) จัดทำภาพวาดอิดิโอแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการนำค่าเฉลี่ยความยาวของโครโมโซมแต่ละคู่มาสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft excel XP/2003 ให้แกนตั้ง (Y) เป็นความยาวของโครโมโซมแต่ละคู่ และแกนนอน (X) เป็นลำดับของโครโมโซมคู่ที่ใหญ่ที่สุดไปหาคู่ที่เล็กที่สุด

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษาโครโมโซมของปลาไหลนาจากอำเภอชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ โดยการย้อมสีโครโมโซมแบบธรรมดา (Figure 3) พบว่า มีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์ $2n = 24$ แท่ง เป็นโครโมโซมชนิดเทโลเซนทริกทั้งหมด จำนวนโครโมโซมพื้นฐาน (NF) เท่ากับ 24 ทั้งเพศผู้และเพศเมีย แคริโอไทป์ประกอบด้วยโครโมโซมขนาดใหญ่ 8 แท่ง ขนาดกลาง 14 แท่ง และขนาดเล็ก 2 แท่ง (Figure 3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปลาไหลนา โดยธวัช ดอนสกุล และวิเชียร มากตุ่น (2539) ; ภาณุพณ ถวิลประวัติ (2556), และ Supiwong *et al*., (2019) พบว่าปลาไหลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์ $2n = 24$ ประกอบด้วยโครโมโซมชนิดอะโครเซนทริกทั้งหมด จำนวนแขนโครโมโซมเท่ากับ 24 ซึ่งโครโมโซมชนิดอะโครเซนทริกเป็นโครโมโซมชนิดเดียวกันกับโครโมโซมชนิดเทโลเซนทริกที่รายงานครั้งนี้ โดยการจำแนกชนิดของโครโมโซมสามารถจำแนกได้ทั้งตามวิธีของ Levan *et al.,* (1964) (จำแนกชนิดโครโมโซมเป็น m, sm, st, a/t) และ Turpin & Lejeune, (1965) (จำแนกชนิดโครโมโซมเป็น m, sm, a, t) และนอกจากนั้นการพบแคริโอไทป์เซลล์ร่างกายทั้งเพศผู้และเพศเมียที่มีชนิดโครโมโซมแบบเดียวกันทั้งหมด ลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะไม่สมมาตร (asymmetrical karyotype) โดยมีโครโมโซมเพียงชนิดเดียว คือโครโมโซมชนิดเทโลเซนทริกทั้งหมด และถือเป็นลักษณะดึกดำบรรพ์ (ancestral) ซึ่งสังเกตพบได้ในปลาเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้น (Molina & Galetti, 2004) อาจพบได้ในปลาทะเล *Pomacentrus coelestis* (Arai & Inoue, 1976), *Chromis chromis* (Alvarez *et al*., 1980) และ *C. multilineata* (Molina & Galetti, 2002) หรือพบได้ในปลาน้ำจืด เช่น พบได้ในปลาวงศ์ปลากราย (Notopteridae) เช่น ปลาตองลาย (*Chitala blanci*) (ธวัช ดอนสกุล และวิเชียร มากตุ่น, 2533 ; Maneechot *et al*., 2014) ปลาสลาด (*Notopterus notopterus*) (Rishi & Singh, 1983 ; Khuda-Bukhsh & Barat, 1987 ; Rishi & Thind, 1994 ; Silawong *et al*., 2012) ที่พบจำนวนโครโมโซม ดิพลอยด์ในปลาตองลายเท่ากับ 42 แท่ง และเป็นชนิดเทโลเซนทริกทั้งหมด (Maneechot *et al*., 2014) ซึ่งมีลักษณะโครโมโซมแบบ asymmetrical karyotype และนอกจากนั้น Supiwong *et al*., (2019) ; ธวัช ดอนสกุล และวิเชียร มากตุ่น (2539) ยังพบจำนวนโครโมโซม ดิพลอยด์ของปลาไหลในภาคกลางของประเทศไทย $2n = 18$ ประกอบด้วยโครโมโซมชนิดเมทาเซนทริก 6 แท่ง และอะโครเซนทริกจำนวน 12 แท่ง จำนวนแขนโครโมโซมเท่ากับ 24 อย่างไรก็ตามปลาชนิดเดียวกันแต่มีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์แตกต่างกันได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ปลาอาศัยอยู่แตกต่างกัน จึงอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครโมโซมเกิดขึ้น อาจเกิดจากการฟิชชัน (fission) หรือการฟิวชัน (fusion) ก็เป็นได้ (ธวัช ดอนสกุล และ วิเชียร มากตุ่น, 2539 ; Getlekha *et al.,* 2016 ; Supiwong *et al*., 2019) ปลาไหลจากภาคตะวันออกเฉียงเหนืออาจจะโบราณกว่าปลาไหลในภาคกลาง ทั้งนี้ปลาที่มีโครโมโซมแขนเดียว (แบบเทโลเซนทริก/อะโครเซนทริก) มากกว่าจะโบราณมากกว่าปลาที่มีโครโมโซมแบบสองแขน (Denton, 1973)

การย้อมสีโครโมโซมด้วยการย้อมแถบสีแบบนอร์ ซึ่งเป็นบริวณที่ติดสีเข้มคือตำแหน่งที่ตั้งของนิวคลีโอลัส (nucleolus) พบตำแหน่งนอร์ 1 ตำแหน่ง บนโครโมโซมคู่ที่ 3 (3a3b) ที่แขนข้างยาว (q) (Figure 4) บริเวณใกล้ตำแหน่งเซนโทรเมียร์ (pericentromeric region) ทั้งในเพศผู้และเพศเมีย การศึกษาครั้งนี้เป็นรายงานครั้งแรกของการพบตำแหน่งนอร์ 1 แท่ง ซึ่งเป็นลักษณะภาวะพหุสัณฐาน (polymorphism) ในปลาไหลนา ซึ่งแตกต่างจากรายงานการศึกษาของ Supiwong *et al.,* (2019) ที่พบตำแหน่งนอร์ของปลาไหล 1 คู่บริเวณใกล้ตำแหน่งเซนโทรเมียร์ บนโครโมโซมคู่ที่ 7 ซึ่งจำนวนและตำแหน่งนอร์บนโครโมโซมสามารถบ่งบอกวิวัฒนาการของโครโมโซมได้ กล่าวคือปลาโดยส่วนใหญ่จะมีนอร์ขนาดเล็กที่โครโมโซมเพียง 1 คู่ เท่านั้น การที่มีมากกว่า 2 ตำแหน่งนั้นอาจเกิดจากการเกิดทรานสโลเคชัน (translocation) บางส่วนของโครโมโซมที่มีนอร์ไปยังโครโมโซมแท่งอื่นๆ (วีระยุทธ สุภิวงค์ และพรพิมล เจียระนัยปรีเปรม, 2552

ทั้งนี้ การย้อมสีแบบนอร์ เพื่อที่จะตรวจสอบตำแหน่งยีนที่สร้างไรโบโซม (18S และ 28S ribosomal RNA) ซึ่งบริเวณนี้เรียกบริเวณนิวคลีโอลาออแกไนเซอร์ หรือนอร์ (nucleolar organizer regions, NORs) และเป็นตำแหน่งโครโมโซมเครื่องหมาย (chromosome marker) จัดเป็น satellite chromosome การพบนอร์ 1 ตำแหน่งในสิ่งมีชีวิต อาจเป็นลักษณะดั้งเดิมของบรรพบุรุษของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ (plesiomorphic)(Amemiya & Gold, 1990)ซึ่งเป็นลักษณะแบบโบราณ (primitive) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ (Chooseangjaew *et al*., 2015) การย้อมด้วยแถบสีแบบนอร์ สามารถยืนยันตำแหน่งเดียวกันกับการย้อมด้วยเทคนิคการย้อมขั้นสูงด้วยเทคนิค FISH (fluorescence *in situ* hybridization) ด้วยโพรบ 18S rDNA (Getlekha *et al*., 2017 ; Supiwong *et al*., 2017) ได้ด้วย

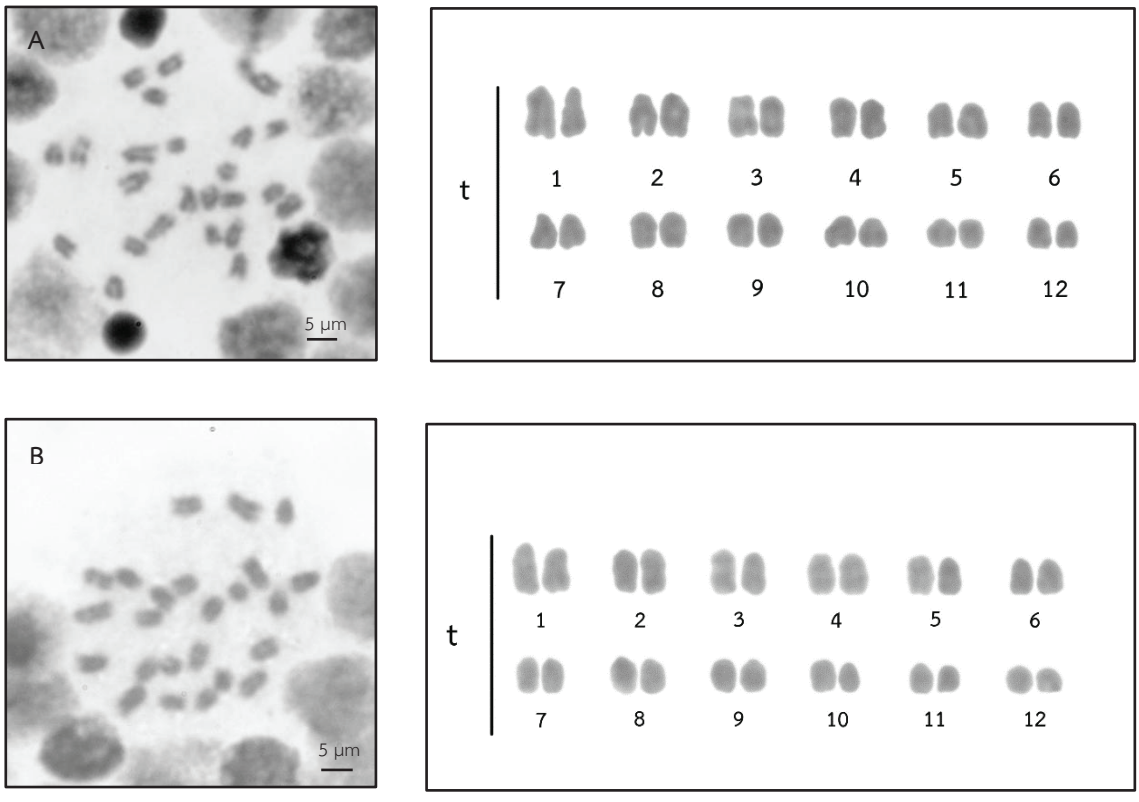


Figure 3 Metaphase chromosome plates and karyotypes of the swamp ell (*M. albus*) male (A) and female (B), 2*n* (diploid) = 24 by conventional straining technique (scale bar indicates 5 µm).

ยีนไรโบโซม 18S rDNA ยังเป็นเครื่องหมายที่ถูกใช้ในปลา *Hoplias malabaricus* เพื่อแยกแต่ละประชากรออกจากกันได้ (Cioffi *et al*., 2009 ; Vicari *et al*., 2005) โครโมโซมเครื่องหมายจากการย้อมยังสามารถนำมาเป็นเครื่องหมายจีโนมเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบหรือยืนยันลักษณะลูกผสมของปลาได้อีกด้วย (Maneechot *et al.,* 2016) เช่น ปลาดุกบิ๊กอุยหรือปลาดุกลูกผสม (*Clarias gariepinus* x *C. macrocephalus*)

Table 1 แสดงข้อมูลความยาวเฉลี่ยของโครโมโซม ความยาวแขนโครโมโซม ความยาวโครโมโซมแต่ละแท่ง ความยาวสัมพัทธ์ของโครโมโซมค่า relative length และ centrometric index (CI) สามารถสร้างสูตรแคริโอไทป์ของปลาไหลนาได้ดังนี้ 2*n* (24) = L^t_8 + M^t_{14} + S^t_2

การศึกษาพันธุศาสตร์ระดับเซลล์ของปลาไหลนา นอกจากศึกษาจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์แล้ว ยังมีการศึกษารูปร่างโครโมโซม วัดขนาดโครโมโซม นำมาจัดทำแคริโอไทป์ สูตรแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานแสดงการจัดเรียงขนาดของโครโมโซมจากคู่ใหญ่ที่สุดไปยังคู่ที่เล็กที่สุดดัง Figure 5 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อศึกษาลำดับวิวัฒนาการของปลาในวงศ์นี้

สำหรับการย้อมแถบสีแบบนอร์ การพบโครโมโซมเครื่องหมายบนตำแหน่งโครโมโซมนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ด้านการปรับปรุงพันธุ์ อนุกรมวิธาน การอนุรักษ์ต่อไปและหากมีการย้อมสีบนโครโมโซมด้วยเทคนิค FISH ของปลาไหลนาจากอำเภอชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์เพื่อศึกษาตำแหน่งของโครโมโซมเครื่องหมายหรือ

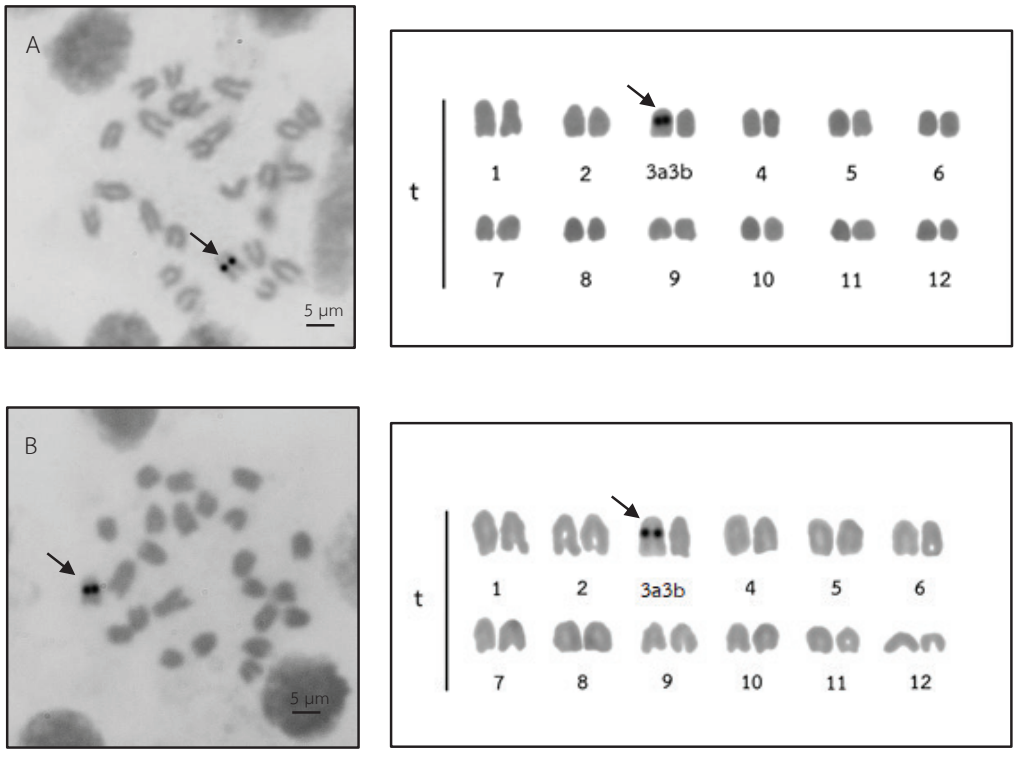


Figure 4 Metaphase chromosome plates and karyotype of the swamp ell (*M. albus*) male (A) and female (B), 2*n* (diploid) = 24 by NOR banding techniques. Arrow indicate the respective different heteromorphic secondary constriction of chromosome pair 3a3b. Scale bars indicates 5 µm.

ตรวจสอบตำแหน่งความผิดปกติของโครโมโซม เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อกลุ่มเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงปลาไหลนา กลุ่มผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือเกษตร ผู้สนใจทั่วไป อันเป็นแนวทางที่จะส่งผลต่อการเติบโตทางธุรกิจซึ่งเป็นกำลังสำคัญต่อการพัฒนาและผลักดันสู่ความยั่งยืนของเศรษฐกิจฐานรากของไทยในอนาคตต่อไป

Table 1 Mean length of short arm chromosome (Ls), length of long arm chromosome (LI), length total arm chromosome (LT), relative length (RL), centromeric index (CI) and standard deviation (SD) of RL and CI, from 30 metaphase cells of male and female swamp eel (*M. albus*), 2*n*=24.

Pair no.	Ls	LI	LT	RL±SD	CI±SD	Size	Type
1	0.00	133.59	133.59	0.1164±0.0066	1.0000±0.0000	Large	telocentric
2	0.00	116.58	116.58	0.1015±0.0032	1.0000±0.0000	Large	telocentric
3*	0.00	110.96	110.96	0.0966±0.0028	1.0000±0.0000	Large	telocentric
4	0.00	106.64	106.64	0.0929±0.0035	1.0000±0.0000	Large	telocentric
5	0.00	99.71	99.71	0.0868±0.0010	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
6	0.00	94.96	94.96	0.0827±0.0022	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
7	0.00	93.51	93.51	0.0815±0.0017	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
8	0.00	89.28	89.28	0.0778±0.0020	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
9	0.00	84.10	84.10	0.0733±0.0027	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
10	0.00	79.09	79.09	0.0689±0.0033	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
11	0.00	73.50	73.50	0.0640±0.0018	1.0000±0.0000	Medium	telocentric
12	0.00	66.15	66.15	0.0576±0.0060	1.0000±0.0000	Small	telocentric

Remark * NOR-bearing chromosome 1 position

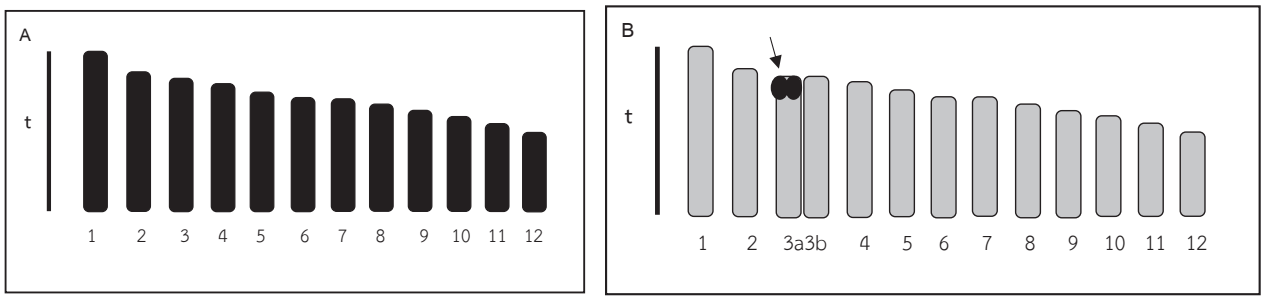


Figure 5 Idiogram of the swamp eel (*M. albus*), 2*n*=24, by conventional straining technique (A) and Ag-NOR banding technique (B). Arrow indicates polymorphism of NORs on pairs 3 (3a3b).

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาแคริโอไทป์และอิดิโอแกรมมาตรฐานของปลาไหลนา โดยเตรียมโครโมโซมจากเนื้อเยื่อไตในระยะเมทาเฟส ย้อมสีโครโมโซมด้วยการย้อมสีแบบธรรมดา และการย้อมสีแบบนอร์ พบว่าปลาไหลนามีจำนวนโครโมโซมดิพลอยด์ (2*n*) เท่ากับ 24 แท่ง เป็นชนิดเทโลเซนทริกทั้งหมด มีจำนวนโครโมโซมพื้นฐาน (NF) เท่ากับ 24 ทั้งในเพศผู้และเพศเมีย แคริโอไทป์ประกอบด้วยชนิดเทโลเซนทริกขนาดใหญ่ 8 แท่ง ขนาดกลาง 14 แท่ง และขนาดเล็ก 2 แท่ง ไม่พบความแตกต่างของโครโมโซมเพศระหว่างปลาเพศผู้และเพศเมีย เมื่อย้อมแถบสีแบบนอร์พบตำแหน่งนอร์ 1 ตำแหน่งในโครโมโซมคู่ที่ 3 (3a3b) ทั้งในเพศผู้และเพศเมีย สามารถเขียนสูตรแคริโอไทป์ ดังนี้

$$2n\ (24) = L^{t}_{8} + M^{t}_{14} + S^{t}_{2}$$

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ขอบคุณทีมวิจัยที่ให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยเหลือตลอดการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ที่อำนวยความสะดวกวัสดุอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กันยารัตน์ ไชยสุต. (2532). *เซลล์พันธุศาสตร์และเซลล์อนุกรมวิธานของพืชสกุล Zephyranthes*. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัช ดอนสกุล, และ วิเชียร มากตุ่น. (2533). การศึกษาโครโมโซมของปลากราย ปลาตองลาย และปลาสลาดที่พบในประเทศไทย. ใน, *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 28* มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (น. 459-466).

ธวัช ดอนสกุล, และ วิเชียร มากตุ่น. (2539). การศึกษาโครโมโซมของปลาไหลในภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย. ใน, *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 34* มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (น. 532-538).

นันทิญา มณีโชติ, นิชาภา เฉตระการ, และ นิภาศักดิ์ คงงาม. (2563). ความหลากชนิดของพันธุ์ปลาในลำน้ำชีสู่ความยั่งยืนของชุมชนในจังหวัดสุรินทร์. *วารสาร PSRU Journal of Science and Technology, 5*(2), 47-58.

นิชาภา เฉตระการ, นันทิญา มณีโชติ, ชูจิต สาระภาค, และ อารีย์ ไกรสูรย์. (2564). ผลของอาหารที่ต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของบ่อเลี้ยงและการเจริญเติบโตของปลาไหลนา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 40*(4), 364-372.

ภาณุพณ ถวิลประวัติ. (2556). การวิเคราะห์ลักษณะแคริโอไทป์ของปลาไหลนา (*Monopterus albus*) ด้วยวิธีทางเซลล์พันธุศาสตร์ในระดับโมเลกุล. *Thai Journal of Genetics, (Special Issue 1)*, 428.

วิรัช จิ๋วแหยม. (2551). ชีววิทยาการสืบพันธุ์และการเพาะขยายพันธุ์เบื้องต้นของปลาไหลนา (*Monopterus albus* Zuiew) โดยให้วางไข่ตามธรรมชาติในบ่อคอนกรีต. *วารสารวิจัย มข., 13*(1), 15-22.

วิรัช จิ๋วแหยม, นำชัย เจริญเทศประสิทธิ์, เพ็ญพรรณ ศรีสกุลเดียว, และ สนอง เทียบศรี. (2547). *การวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลาไหลนาเพื่อการค้า: การอนุบาลและการเลี้ยง*. รายงานการวิจัย. ภาควิชาประมง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วีระยุทธ สุภิวงค์, และ พรพิมล เจียระนัยปรีเปรม. (2552). พันธุศาสตร์เซลล์ของปลาชะโด (*Channa micropeltes*) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. ใน, *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยขอนแก่น (National graduate research conference) ครั้งที่ 12* (น. 1584-1590).

ศรันย์ จำรัสธนสาร, และ ประวีรณ์ สุพรรณอ่วม. (2561). แคริโอไทป์และไอดิโอแกรมมาตรฐานของปลากัดจีน (*Betta splendens* 'Veil Tail') ด้วยการย้อมสีแบบจิมซ่า. *วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาส์น, 39*, 85-95.

สุวรรณดี ขวัญเมือง. (2533). การศึกษาเบื้องต้นทางชีววิทยาบางประการและการทดลองเพาะพันธุ์ปลาไหลนา. *วารสารการประมง, 47*(6), 491-508.

อลงกลด แทนออมทอง. (2554). *พันธุศาสตร์เซลล์*. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Ivarez, M. C., Cano, J., & Thode, G. (1980). DNA content and chromosome complement of *Chromis chromis* (Pomacentridae, Perciformes). *Caryologia, 33*, 267-274.

Amemiya, C. T., & Gold, J. R. (1990). Cytogenetic studies in North American minnows (Cyprinidae): Chromosomal NOR phenotypes of 12 species, with comments on cytosystematic relationships among 50 species. *Hereditas, 112*, 231-247.

Arai, R., & Inoue, M. (1976). Chromosomes of seven species of Pomacentridae and two species of Acanthuridae from Japan. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science Series A, 2*, 73-78.

AVMA. (2020). *Guidelines for the euthanasia of animals* (2020 edition). American Veterinary Medical Association.

Chen, T. R., & Ebeling, A. W. (1968). Karyological evidence of female heterogamety in the mosquito fish, *Gambusia affinis*. *Copeia, 1*, 70-75.

Chooseangjaew, S., Tanyaros, S., Maneechot, N., Buasriyot, P., Getlekha, N., & Tanomtong, A. (2015). Chromosomal characteristics of the tropical oyster, *Crassostrea belcheri* Sowerby, 1871 (Ostreoida, Ostreidae) by conventional and Ag-NOR banding techniques. *Cytologia, 82*(1), 3-8.

Cioffi, M. B., Martins, C., & Bertollo, L. A. C. (2009). Comparative chromosome mapping of repetitive sequences: Implications for genomic evolution in the fish, *Hoplias malabaricus*. *BMC Genetics, 10*, 34.

Collins, T. M., Trexler, J. C., Nico, L. G., & Rawlings, T. A. (2002). Genetic diversity in a morphologically conservative invasive taxon: Multiple introductions of swamp eels to the Southeastern United States. *Conservation Biology, 16*, 1024-1035.

Denton, T. E. (1973). *Fish chromosome methodology*. Charles C. Thomas Publisher.

Froese, R., & Pauly, D. (2010). *FishBase*. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org.

Getlekha, N., Molina, W. F., Cioffi, M. B., Yano, C. F., Maneechot, N., Bertollo, L. A. C., Supiwong, W., & Tanomtong, A. (2016). Repetitive DNAs highlight the role of chromosomal fusions in the karyotype evolution of *Dascyllus* species (Pomacentridae, Perciformes). *Genetica, 144*(2), 203-211.

Getlekha, N., Molina, W. F., Cioffi, M. B., Yano, C. F., Maneechot, N., Bertollo, L. A. C., Supiwong, W., Tanomtong, A., & Molina, W. F. (2017). Chromosome mapping of repetitive DNAs in sergeant major fishes (Abudefdufinae, Pomacentridae): A general view on the chromosomal conservatism of the genus. *Genetica, 144*, 567-576.

Guan, R. Z., Zhou, L. H., Cui, G. H., & Feng, X. H. (1996). Studies on the artificial propagation of *Monopterus albus* (Zuiew). *Aquaculture Research, 27*, 587-596.

Howell, W. M., & Black, D. A. (1980). Controlled silver-staining of nucleolus organizer regions with a protective colloidal developer: A 1-step method. *Experientia, 36*, 1014-1015.

Inger, R. F., & Kong, C. P. (1962). *The fresh-water fishes of north Borneo*. Fieldiana, Zoology 45, 1-286.

Jayaram, K. C. (1981). *The freshwater fishes of India, Pakistan, Bangladesh, Burma and Sri Lanka: A handbook*. Zoological Survey of India.

Khuda-Bukhsh, A. R., & Barat, A. (1987). Chromosomes in fifteen species of Indian teleosts (Pisces). *Caryologia, 40*, 131-144.

Kottelat, M. (1998). Fish of Nam Theun and Xe Bangfai Basins, Laos, with diagnoses of twenty-two species (Teleostei: Cyprinidae, Baltoridae, Cobitidy, Coiidae and Odontobutidae). *Ichthyological Exploration of Freshwaters, 1*, 1-128.

Levan, A., Fredga, K., & Sandberg, A. A. (1964). Nomenclature for centromeric position on chromosome. *Hereditas, 52*, 201-220.

Maneechot, N., Supiwong, W., Jumrasthanasan, S., Siripiyasing, P., Pinthong, K., & Tanomtong, A. (2014). Chromosomal characteristics of the royal knifefish, *Chitala blanci* (Osteoglossiformes, Notopteridae) by conventional and Ag-NOR staining techniques. *Cytologia, 80*(2), 159-166.

Maneechot, N., Yano, C. F., Bertollo, L. A. C., Getlekha, N., Molina, W. F., Ditcharoen, S., Tenjaroenkul, B., Supiwong, W., Tanomtong, A., & Cioffi, M. B. (2016). Genomic organization of repetitive DNAs highlights chromosomal evolution in the genus *Clarias* (Clariidae, Siluriformes). *Molecular Cytogenetics, 9*, 4.

Molina, W. F., & Galetti, Jr. P. M. (2002). Robertsonian rearrangements in the reef fish *Chromis* (Perciformes, Pomacentridae) involving chromosomes bearing 5S rRNA genes. *Genetics and Molecular Biology, 25*, 373-377.

Molina, W. F., & Galetti, Jr. P. M. (2004). Multiple pericentric inversions and chromosomal divergence in the reef fishes *Stegastes* (Perciformes, Pomacentridae). *Genetics and Molecular Biology, 27*(4), 543-548.

Muslimatun, A., Nor, S. H. M., Hou, C. H., Siew, I. N., Mhd, I., Seng, C. P., & Connie, F. K. (2018). Proximate and mineral compositions of rice field eel *Monopterus albus*. *International Journal of Engineering & Technology, 7*(4.43), 72-77.

Nelson, J. S. (1994). *Fishes of the world* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Nichols, J. T. (1943). *The freshwater fishes of China*. Natural history of Central Asia: Volume IX. The American Museum of Natural History.

Rishi, K. K., & Singh, J. (1983). Chromosomes of *Notopterus notopterus* (Pallas) (Notopteridae: Clupeiformes). *Chromosome Information Service, 34*, 9-10.

Rishi, K. K., & Thind, A. D. K. (1994). C-heterochromatin and NOR-localization in the chromosomes of *Notopterus notopterus* (Notopteridae: Clupeiformes: Osteichthyes). *Chromosome Information Service, 57*, 20-21.

Silawong, K., Aoki, S., Supiwong, W., Tanomtong, A., Khakhong, S., & Sanoamuang, L. (2012). The first chromosome characteristics of nucleolar organizer regions (NORs) in grey featherback fish, *Notopterus notopterus* (Osteoglossiformes, Notopteridae) by conventional and Ag-NOR straining technique. *Cytologia, 77*, 279-285.

Supiwong, W., Jiwyam, W., Sreeputhorn, K., Maneechot, N., Bertollo, L. A. C., Cioffi, M. B., Getlekha, N., & Tanomtong, A. (2017). First report on classical and molecular cytogenetics of archerfish, *Toxotes chatareus* (Perciformes: Toxotidae). *Nucleus, 60*, 349-359.

Supiwong, W., Pinthong, K., Seetapan, K., Saenjundaeng, P., Bertollo, L. A. C., Oliveira, E. A., Yano, C. F., Liehr, T., Phimphan, S., Tanomtong, A., & Cioffi, M. B. (2019). Karyotype diversity and evolutionary trends in the Asian swamp eel *Monopterus albus* (Synbranchiformes, Synbranchidae): A case of chromosomal speciation. *BMC Evolutionary Biology, 19*, 73.

Talwar, P. K., & Jhingran, A. G. (1992). *Inland fishes of India and adjacent countries* (Vol. 2). A.A. Balkema.

Turpin, R., & Lejeune, J. (1965). *Les chromosomes humains*. Gauthier-Villars.

Vicari, M. R., Artoni, R. F., & Bertollo, L. A. C. (2005). Comparative cytogenetics of *Hoplias malabaricus* (Pisces, Erythrinidae): A population analysis in adjacent hydrographic basins. *Genetics and Molecular Biology, 28*, 103-110.

ผลของสารสกัดหยาบจากเปลือกผลมังคุดต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ในกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกผลมังคุด

Crude mangosteen peel extracts inhibit *Staphylococcus aureus* in durian peel-based paper

พรลภัส บุญวิชัย[1], ณัฏฐกิตติ์ ศิริกาญจนโรจน์[1] และ อรวรรณ ปิยะบุญ[2*]
Pornlapas Boonwichai[1], Nattakit Sirikanjanaroat[1] and Orawan Piyaboon[2*]

Received: 21 October 2023 ; **Revised**: 28 December 2023 ; **Accepted**: 30 April 2024

บทคัดย่อ

ในบรรจุภัณฑ์กระดาษสำหรับอาหารพบการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ดังนั้นการใช้สารสกัดจากเปลือกผลมังคุดยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ นอกจากนี้เส้นใยเปลือกทุเรียนเป็นเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรและสามารถผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร งานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดเพื่อยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* โดยนำเปลือกมังคุดแห้งไปสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลความเข้มข้น 95 % จากนั้นสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดถูกทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี agar disc diffusion พบว่าสามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ และค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (MIC) และค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (MBC) คือ 0.24 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 0.98 มิลลิกรัม/ มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นเตรียมเส้นใยกระดาษจากเปลือกทุเรียนเพื่อทำกระดาษผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตรด้วยการผสมและไม่ผสมแป้งมันสำปะหลังเพื่อทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ผลการทดลองพบว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตรด้วยการผสมและไม่ผสมแป้งมันสำปะหลังสามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ และการทดสอบความหนา เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงดึงของกระดาษจากเปลือกทุเรียน พบว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 3 มีการดูดซึมน้ำและความต้านทานแรงดึงขาดแตกต่างจากกระดาษเปลือกทุเรียนสูตรอื่น ดังนั้นกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดสามารถพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับยืดอายุของอาหารได้

คำสำคัญ: สารสกัดหยาบจากเปลือกผลมังคุด, เปลือกทุเรียน, เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus*

Abstract

Paper packaging for food is contaminated with microorganisms, particularly *Staphylococcus aureus*. Therefore, the extracts from mangosteen peels are utilized for their antibacterial properties. Additionally, durian rind fibers, a form of agricultural waste, can be used to produce food packaging. This research aimed to develop a paper from durian rind fibers combined with mangosteen peel crude extract to inhibit *S. aureus*. Dried mangosteen peels were extracted using the maceration method with 95% ethanol. The antibacterial activity of the crude extract was tested against *S. aureus* using the agar disc diffusion method, which demonstrated its inhibitory properties. The minimal inhibitory concentration (MIC) and minimal bactericidal concentration (MBC) of the extract were 0.24 mg/ml and 0.98 mg/ml, respectively. Therefrom, durian rind fibers were then prepared and combined with 65 mg/ml of mangosteen peel crude extract, both with and without tapioca flour, to produce paper samples. The paper samples inhibited the growth of *S. aureus*. Furthermore, the physical properties, including thickness, water absorption, and tensile strength, were

[1] นักเรียน, มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ นครปฐม จังหวัดนครปฐม 73170
[2] ครู, มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ นครปฐม จังหวัดนครปฐม 73170
[1] Student, Department of Biology and Health Science, Mahidol Wittayanusorn School, Nakhon Pathom, 73170
[2] Teacher, Department of Biology and Health Science, Mahidol Wittayanusorn School, Nakhon Pathom, 73170
* Correspondent author: orawan.piy@mwit.ac.th

tested. Among all formulations, the third formula exhibited lower water absorption and tensile strength compared to the other samples. In conclusion, paper made from durian rind fibers combined with mangosteen peel crude extract demonstrated antibacterial properties and could be developed as food packaging material for prolong food shelf life and reduce spoilage.

Keywords: Crude extracts from mangosteen peel, Durian peel, *Staphylococcus aureus*

บทนำ

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม อายุการเก็บของอาหาร และสามารถรักษาคุณภาพของอาหารให้คงอยู่จนกระทั่งบริโภคหมดได้ การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ ได้แก่ การลดต้นทุนการผลิตให้มากที่สุด การรักษาคุณภาพของอาหารให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร และคณะ, 2563) โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์กระดาษนั้นใช้วัตถุดิบหลักในการผลิตคือกระดาษซึ่งผลิตจากวัสดุธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ง่าย มีคุณสมบัติแข็งแรง สามารถใช้ในการรักษาคุณภาพของอาหาร และนำกลับมาใช้โดยผ่านกระบวนการแปรรูป มีความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้บริโภค และไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ตอบสนองความต้องการของสังคมและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (กรรณิการ์ ชนากานต์กร และคณะ, 2564)

ปัจจุบันการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษสำหรับอาหารที่สามารถเก็บรักษาอาหารในอุณหภูมิไม่เหมาะสมและเก็บไว้เป็นเวลานานก่อนการรับประทานมักพบการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถก่อโรคในระบบทางเดินอาหารเนื่องจากสามารถสร้าง enterotoxin ทำให้ผู้รับประทานเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้อง และอ่อนเพลียได้ (กิตติมา ไมตรีประดับศรี และคณะ, 2563) ในปัจจุบันการควบคุมหรือยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* สามารถใช้พืชสมุนไพรที่มีองค์ประกอบทางพฤกษเคมี (phytochemicals) และฤทธิ์ทางชีวภาพ (biological activity) เนื่องจากสาร เมแทบอไลท์ทุติยภูมิ (secondary metabolites) มีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเปลือกผลมังคุดมีสารกลุ่มแซนโทน ได้แก่ alpha-mangostins (α-mangostin) มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียเทียบเท่ายาปฏิชีวนะ (วรรณี สมัปปิโต และคณะ, 2560)

นอกจากนี้การใช้วัสดุธรรมชาติในการสร้างบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ขึ้นรูปจากเยื่อบรรจุภัณฑ์อาหารย่อยสลายได้ทางชีวภาพและบรรจุภัณฑ์รักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น งานวิจัยของประทุมทอง ไตรรัตน์ (2560) ได้ผลิตบรรจุภัณฑ์เยื่อกระดาษขึ้นรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร (ต้นเฮลิโคเนีย ก้านกุหลาบ และต้นกระถิน) ดังนั้นการนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นเปลือกผลไม้ที่เหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการเพื่อขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์กระดาษ จึงมีความเป็นไปได้เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม เส้นใยมีความแข็งแรง ความเหนียว และความยืดหยุ่น (วริศชนม์ นิลนนท์ และคณะ, 2564) นอกจากนี้เส้นใยของเปลือกทุเรียนยังคล้ายกับเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง มีเจล และเพคติน ทำให้ต้านทานการซึมน้ำและไขมัน (คงศักดิ์ เลิศอนันตสุข และเบญจรัตน์ พจน์ศิริศิลป, 2548) จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติและสภาพพิมพ์ด้วยระบบพ่นหมึกของกระดาษที่ผลิตจากเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองและพันธุ์ก้านยาวพบว่าเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีคุณภาพด้านความขาวและคุณภาพงานพิมพ์สีบนกระดาษที่ดีกว่าเปลือกทุเรียนพันธุ์ก้านยาว (นิทัศน์ พิมย์โสตนัยนา และสุชปา เนตรประดิษฐ์, 2550) และจากการทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ ความต้านแรงฉีกขาด ความต้านแรงดึงขาดและการยืดตัว ความต้านแรงดันทะลุของกระดาษจากเส้นใยเปลือกทุเรียนฟอกกับเส้นใยจากเปลือกทุเรียนไม่ฟอกพบว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนแบบไม่ฟอกมีคุณสมบัติดีกว่าแบบฟอก (วริศชนม์ นิลนนท์ และคณะ, 2564)

ดังนั้น ผู้วิจัยได้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร คือ เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาพัฒนาเป็นกระดาษที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ซึ่งอาจเป็นทางเลือกใหม่ของการผลิตกระดาษจากธรรมชาติที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาและเพิ่มคุณค่าทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศอีกด้วย

วิธีการศึกษา

1. การเตรียมตัวอย่างและการสกัดสารจากเปลือกมังคุด (นุศวดี พจนานุกิจ และสมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, 2553)

มังคุดสายพันธุ์พื้นเมือง อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน ถูกเก็บจากสวนมังคุดแม่นา ตำบลถ้ำ อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา จำนวน 24 กิโลกรัม เปลือกมังคุดถูกนำมาล้างและตัดขั้วและคว้านเนื้อออก หลังจากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง แล้วนำไปบดให้ละเอียดเป็นผงได้น้ำหนักแห้งจำนวน 6.60 กิโลกรัม จากนั้นนำมาสกัดด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 95% ปริมาตร 18 ลิตร นาน 7 วัน แล้วนำสารสกัดมากรองด้วยกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1 แล้วนำสารละลายทั้งหมดมาระเหยตัว

ทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้สารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดจำนวน 0.41 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักสุทธิ (percent yield) 10.99% จากน้ำหนักแห้ง เก็บไว้ในภาชนะหุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2. การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด

ทำการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดทั้งหมด 3 วิธี

2.1 การทดสอบหาบริเวณยับยั้งเชื้อ (inhibiting zone) ด้วยวิธี agar disc diffusion (Newberry *et al*., 2007)

เชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้จากภาควิชาชีวเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ถูกนำมาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar (NA) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาทดสอบความสามารถของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยการออกแบบการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ โดยแต่ละกรรมวิธีทำซ้ำ 5 ซ้ำ กรรมวิธีควบคุมเชิงลบ คือ น้ำกลั่นฆ่าเชื้อ และกรรมวิธีควบคุมเชิงบวก คือ คลินดามัยซิน (clindamycin) ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนกรรมวิธีทดลอง คือ สารสกัดหยาบเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 และ 125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยการหยดสารดังกล่าวปริมาตร 30 ไมโครลิตร ลงบน sterile paper disc ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (ยี่ห้อ Whatman, England) หลังจากนั้นเชื้อแบคทีเรีย*S. aureus* ความเข้มข้น 1X10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ถูกเกลี่ยลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA ทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้ส่วนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อแห้ง หลังจากนั้นวาง paper disc ของสารต่างๆ ที่เตรียมได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้ง (inhibiting zone หรือ clear zone) โดยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร บันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA หาความแตกต่างทางสถิติของแต่ละกรรมวิธีด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ P<0.01

2.2 การหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* (minimal inhibitory concentration, MIC) ด้วยวิธี Colorimetric broth micro-dilution (Coelho *et al*., 2021)

ในการทดสอบฤทธิ์เบื้องต้นพบว่าสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ต่อจากนั้นจึงทดสอบหาความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียใช้ 96-well microplate โดยให้แต่ละหลุมมีเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ที่มีความความเข้มข้น 1X10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยการทำการเจือจางสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth (NB) แบบลำดับสอง (2-fold serial dilution) ในmicrotiter plate ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ โดยสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้นสูงสุดที่ทดสอบอยู่ในช่วง 0.12-125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ใน microplate สำหรับกรรมวิธีควบคุมเชิงลบ คือ น้ำกลั่นฆ่าเชื้อ โดยแต่ละกรรมวิธีทำ 3 ซ้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใส่สารละลายรีซาซูริน (resazurin) ปริมาตร 50 ไมโครลิลิตรจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกผลจากการเปลี่ยนแปลงสีของรีซาซูริน ถ้าเปลี่ยนจากสีน้ำเงินม่วงเป็นสีชมพู แปลผลได้ว่ามีเชื้อแบคทีเรียรอดชีวิต (bacterial viability)

2.3 *การทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย S. aureus* (minimal bactericidal concentration, MBC) (Coelho *et al*., 2021)

นำสารละลายจากหลุมใน 96-well microplate ที่ใช้หาค่า MIC หลุมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีรีซาซูริน (น้ำเงิน) มาหยดบนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA ปริมาตร 10 ไมโครลิตร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแต่ละกรรมวิธีทำ 3 ซ้ำ บันทึกผลการทดลองจากความเข้มข้นที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้และไม่พบการเจริญของแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA จดบันทึกค่า MBC หรือความเข้มข้นของสารสกัดที่สามารถฆ่าเชื้อได้จากจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

3. การขึ้นรูปแผ่นกระดาษจากเส้นใยเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด

นำเปลือกทุเรียนแห้งจากสวนถ้ำสิงห์ ตำบลวิสัยเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร มาต้มกับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อเปลือกทุเรียนแห้ง 1 กรัม แล้วนำเปลือกทุเรียนแห้งมากรองและล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปต้มกับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 M อีกครั้ง แล้วกรองและล้างด้วยน้ำสะอาด เส้นใยจากเปลือกทุเรียนถูกนำมาปั่นและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง โดยเปลือกทุเรียนแห้ง 1.99 กิโลกรัม สามารถเตรียมเส้นใยกระดาษได้น้ำหนักแห้ง 0.71 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักสุทธิ 35.43% จากน้ำหนักแห้ง

นำเส้นใยกระดาษจากเปลือกทุเรียนจำนวน 1.81 กรัม มาแช่น้ำปริมาตร 364 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาขึ้นรูปแผ่นกระดาษจำนวน 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1: เส้นใย

กระดาษผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แต่ไม่ใส่แป้งมันสำปะหลัง สูตรที่ 2: เส้นใยกระดาษผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตรและใส่แป้งมันสำปะหลัง สูตรที่ 3: เส้นใยกระดาษไม่ผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดและไม่ใส่แป้งมันสำปะหลัง และสูตรที่ 4: เส้นใยกระดาษไม่ผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดและใส่แป้งมันสำปะหลัง นำไปเทใส่แม่พิมพ์ขนาดความยาว 25 เซนติเมตร ความกว้าง 15 เซนติเมตร และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. การทดสอบประสิทธิภาพของกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus*

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยแต่ละกรรมวิธีทำ 3 ซ้ำ มี 4 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีทดลอง 3 กรรมวิธี คือ กระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ส่วนกรรมวิธีควบคุม คือ กระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 4 โดยนำเซลล์แขวนลอยของแบคทีเรีย *S. aureus* ความเข้มข้น $1X10^8$ CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาเกลี่ยบนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA แล้วนำกระดาษจากเปลือกทุเรียนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรแต่ละกรรมวิธีวางลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ NA ในจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใส บันทึกผลและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA หาความแตกต่างแต่ละกรรมวิธีด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ P<0.01

5. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเปลือกทุเรียนที่ผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด

วางการทดลองแบบ CRD โดยแต่ละกรรมวิธีทำ 3 ซ้ำ มี 4 กรรมวิธี ได้แก่ กระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 โดยกระดาษจากเปลือกทุเรียนทั้ง 4 สูตรถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

5.1 วัดความหนาของกระดาษด้วยเวอร์เนียร์

คาลิปเปอร์ (vernier caliper) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ทำ 3 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย

5.2 วัดเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (ดัดแปลงวิธี

จากกฤติยา วงศ์เลน, 2555) โดยการอบชิ้นกระดาษอุณหภูมิ 50°C 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักชิ้นกระดาษก่อนแช่น้ำกลั่น แล้วนำชิ้นกระดาษมาแช่น้ำเป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นกระดาษหลังแช่น้ำกลั่น หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำตามสมการ ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ = PW-PD/PD

เมื่อ

PW = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการทดลองดูดซึมน้ำ

PD = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการทดลองดูดซึมน้ำ

วัดความต้านทานแรงดึง (tensile strength) โดยเครื่อง Universal testing machine นำแผ่นกระดาษตัวอย่างขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร กำหนดระยะจับชิ้นงานไว้ที่ 50 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบ 3 ซ้ำแล้วนำมาคำนวณดังสมการดังนี้

$\sigma = F/A$

เมื่อ

σ คือความต้านทานแรงดึง

F คือแรงภายนอกที่มากระทำ

A คือพื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ

บันทึกผลคุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA และหาความแตกต่างของแต่ละกรรมวิธีด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ P<0.01

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด

ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด พบว่าความเข้มข้น 65 และ 125 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ และสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 125 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* แตกต่างกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.01) ใน Table 1 แสดงว่าบริเวณยับยั้งเชื้อแปรผันตรงกับปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดหยาบ

สำหรับผลการหาค่าบริเวณยับยั้งเชื้อเป็นการทดสอบฤทธิ์เบื้องต้นว่าสารสกัดหยาบมีความสามารถยับยั้งเชื้อได้หรือไม่ หลังจากมีการทดสอบหาความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (MIC) ของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด ผลการทดลองพบว่ามีค่า MIC เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ*การทดสอบหาความ*

เข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดสามารถฆ่าของเชื้อแบคทีเรีย (MBC) ผลการทดลองพบว่าค่า MBC เท่ากับ 0.98 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร เนื่องสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดมีสารส่วนใหญ่เป็นสาร xanthone ในกลุ่มแอลฟาแมงโกสติน (alpha-mangostin) รวมถึงสาร tannin, flavonoid เป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) สารแอลฟาแมงโกสตินมีสมบัติในการต้านการอักเสบและต้านการเจริญของจุลินทรีย์ (antimicrobial) (สิรภพ นาคะวัจนะ และคณะ, 2563) โดยการศึกษาของ Torrungruang *et al*. (2007) พบว่าสารสกัดจากเปลือกผลมังคุดมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของ *S. aureus, S. epidermidis, Pseudomonas aeruginosa, Salmonella Typhimurium, Enterococcus* spp., *Mycobacterium tuberculosis* และ *Propionibacterium* เนื่องจากแอลฟาแมงโกสตินไปยับยั้งการสร้างโปรตีนในแบคทีเรียและทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียมีผลต่อการสูญเสียองค์ประกอบภายในเซลล์ (Koh *et al*., 2013)

2. ประสิทธิภาพของกระดาษจากเปลือกทุเรียนกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus*

กระดาษจากเปลือกทุเรียนที่ผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในสูตรที่ 1 และ 2 สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* เนื่องจากส่วนประกอบของกระดาษมีสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ดัง Figure 1

จาก Table 2 พบว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในสูตรที่ 1 และ 2 มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และ 4.0 มิลลิเมตร และกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในสูตรที่ 1 และ 2 มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* มากกว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 3 และ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.01) และกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดในสูตรที่ 1 และ 2 มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.01) พร้อมทั้งกระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 3 และ 4 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.01)

Table 1 Zone of inhibition observed for *S. aureus*

Compound	Mean diameter of zone of inibition (mm±SD)
Treatment 1: 2.5 mg/ml Clindamycin	41.5±0.34a[1]
Treatment 2: Sterilized water	0.00±0.00d
Treatment 3: 65 mg/ml mangosteen peel extracts	4.9±0.15c
Treatment 4: 125 mg/ml mangosteen peel extracts	7.1±0.09b

[1]Means±SD followed by the same letter do not significantly different at P<0.01

Figure 1 Anti-*Staphylococcus aureus* by paper made from durian peel mixed with mangosteen peel extracts

Table 2 The antimicrobial activities of paper packaging from durian peel and mangosteen peel extracts

Paper formula	Mean diameter of the zone of inhibition (mm±SD)
The first formula: durian rind fibers combined with 65 mg/ml of mangosteen peel crude extract, without tapioca flour	3.5±0.08a[1]
The secondary formula: durian rind fibers combined with 65 mg/ml of mangosteen peel crude extract, both with tapioca flour	4.0±0.07a
The third formula: durian rind fibers only	0.00±0.00b
The fourth formula: durian rind fibers with tapioca flour	0.00±0.00b

[1] Means±SD followed by the same letter do not significantly different at $P<0.01$

3. คุณสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด

เส้นใยจากเปลือกทุเรียนสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษได้ เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีส่วนประกอบของพอลิแซคคาไรด์และเซลลูโลสสูง ซึ่งเป็นกลุ่มของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (วริศชนม์ นิลนนท์ และคณะ, 2564) โดยกระดาษจากเปลือกทุเรียนจำนวน 4 สูตร มีความหนาของกระดาษไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.01) ดังแสดงใน Table 3 แสดงให้เห็นว่าการผสมสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดและแป้งมันสำปะหลังไม่มีผลต่อความหนาของกระดาษจากเปลือกทุเรียน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leulee Nortoualee (2564) ศึกษาแผ่นกระดาษฟางข้าวที่ปรับปรุงการใส่แป้งมันสำปะหลังและไม่ใส่แป้งมันสำปะหลังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.01) และกระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์ในการดูดซึมน้ำแตกต่างจากกระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *(P*<0.01) ส่วนกระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 3 เป็นกระดาษจากเปลือกทุเรียนไม่ได้ผสมสารสกัดหยาบเปลือกมังคุดและไม่ผสมแป้งมันสำปะหลังมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่ากระดาษจากเปลือกทุเรียนสูตรที่ 4 เป็นกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมสารสกัดหยาบเปลือกมังคุดและไม่ผสมแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.01) แสดงว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังในกระดาษจากเปลือกทุเรียนมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง เพราะแป้งมันสำปะหลังมีส่วนช่วยความยืดหยุ่นมากขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการ Cross-link ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยเซลลูโลส (Soykeabkaew *et al*., 2004)

Table 3 Physical properties of paper packaging from durian peel and mangosteen peel extracts

Paper formula	Physical properties		
	thickness (mm±SD)	percent of water absorption (%±SD)	tensile strength (lbf/in^2 ±SD)
The first formula	0.73±0.06a[1]	83.63±0.57b	4.17±0.95ab
The secondary formula	0.73±0.06a	86.87±1.34a	4.06±1.27ab
The third formula	0.70±0.10a	85.01±0.08ab	2.98±0.94b
The fourth formula	0.63±0.06a	81.28±0.60c	6.10±1.06a

Paper formula: the first formula: durian rind fibers combined with 65 mg/ml of mangosteen peel crude extract, without tapioca flour, the secondary formula: durian rind fibers combined with 65 mg/ml of mangosteen peel crude extract, both with tapioca flour, the third formula: durian rind fibers only and The fourth formula: durian rind fibers with tapioca flour

[1] Means±SD followed by the same letter do not significantly different at $P<0.01$

สรุปผลการทดลอง

สารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยกระดาษจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุดความเข้มข้น 65 มิลลิกรัม/มิลลิลิตรทั้งการผสมและไม่ผสมแป้งมันสำปะหลังสามารถยับยั้งการเจริญเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ดังนั้นกระดาษที่ทำจากเปลือกทุเรียนผสมกับสารสกัดหยาบจากเปลือกมังคุด จึงเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากเศษเหลือเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาชีววิทยาและวิทยาศาสตร์สุขภาพ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ได้ให้ทุนวิจัย และการสนับสนุนเครื่องมือและสารเคมีสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

คงศักดิ์ เลิศอนันตสุข, และ เบญจรัตน์ พจน์ศิริศิลป. (2548). *การศึกษาสมบัติของกระดาษจากเยื่อผสมของเปลือกทุเรียนและปอสาเพื่อใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์*. โครงงานระดับปริญญาตรี, ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กรรณิการ์ ชนากานต์กร, มนูญ โต๊ะยามา, และ วสุ สุวรรณวิหค. (2564). ปัจจัยที่มีผลต่อนวัตกรรมและผลิตภาพการผลิตรวมของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กระดาษในประเทศไทย. *วารสารสุโขทัยธรรมาธิราช, 34*(1), 32-48.

นิทัศน์ พิมย์โสตนัยนา, และ สุชปา เนตรประดิษฐ์. (2550). การพัฒนากระดาษเปลือกทุเรียนสองพันธุ์สำหรับการพิมพ์ระบบพ่นหมึก. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 38*(6), 15-18.

นุศวดี พจนานุกิจ, และ สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม. (2553). เปรียบเทียบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดจากเปลือกมังคุด ขมิ้นชัน และใบบัวบก. *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 18*(1), 1-9.

ประทุมทอง ไตรรัตน์. (2560). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากวัสดุเหลือจากภาคการเกษตรและวัชพืชแบบเยื่อกระดาษขึ้นรูปสำหรับผลไม้. *วารสารวิชาการศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย, 8*(2), 186-199.

พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร, ศิริพร ปิยะศรี, และ สุชาดา เปียสันเทียะ. (2563). แผ่นวัสดุเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารโดยใช้เศษเหลือทิ้งทางการเกษตร. *วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, 5*(1), 43-52.

วริศชนม์ นิลนนท์, กุลพร พุทธมี, จิรพร สวัสดิการ, คมสัน มุ่ยสี, และ ประมวล ศรีกาหลง. (2564). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากเส้นใยเปลือกทุเรียนแบบฟอกขาวและไม่ฟอกขาว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 40*(6), 422-429.

วรรณี สมัปปิโต, ศุภชัย สมัปปิโต, และ ลือชัย บุตคุป. (2560). ผลของสารสกัดจากเปลือกมังคุด ไพล และน้ำมันไพลต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 36*(1), 53-60.

สิรภพ นาคะวัจนะ, สิตานันท์ ศรีสุภาสิตานนท์, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, ประกิต สุขใย, และ อรวรรณ ปิยะบุญ. (2563). ฤทธิ์ต้านเชื้อก่อสิว *Staphylococcus epidermidis* ด้วยแผ่นปิดสิวเซลลูโลสชีวภาพจากสารสกัดเปลือกมังคุด. *วารสารวิชาการสาธารณสุข, 29*(4), 711-718.

Leulee Nortoualee. (2564). *การเพิ่มมูลค่าฟางข้าวโดยการผลิตเป็นกระดาษบรรจุภัณฑ์* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้].

Coelho, V. C., Neves, S. D. P., Giudice, M. C., Benard, G., Lopes, M. H., & Sato, P. K. (2021). Evaluation of antimicrobial susceptibility testing of *Nocardia* spp. isolates by broth microdilution with resazurin and spectrophotometry. *BMC Microbiology, 21*, 331. https://doi.org/10.1186/s12866-021-02393-9

Koh, J. J., Qiu, S., Zou, H., Lakshminarayanan, R., Li, J., Zhou, X., Tang, C., Saraswathi, P., Verma, C., Tan, D. T., Tan, A. L., Liu, S., & Beuerman, R. W. (2013). Rapid bactericidal action of alpha-mangostin against MRSA as an outcome of membrane targeting. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 1828*(2), 834-844. https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2012.11.015

Newberry, B. M., Shabahang, S., Johnson, N., Aprecio, R. M., & Torabinejad, M. (2007). The antimicrobial effect of biopure MTAD on eight strains of *Enterococcus faecalis*: An in vitro investigation. *Journal of Endodontics, 33*(11), 1352-1354. https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.07.021

Soykeabkaew, N., Supaphol, P., & Rujiravanit, R. (2004). Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate Polymers, 58*(1), 53-63. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.037

Torrungruang, K., Vichienroj, P., & Chutimaworapan, S. (2007). Antibacterial activity of mangosteen pericarp extract against cariogenic *Streptococcus mutans*. *Chulalongkorn University Dental Journal, 30*, 1-10.

การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เพื่อประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างเพื่อการส่งออก ไปยังแขวงอุดมไซ สปป.ลาว

Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) for selecting an alternative route for transporting construction materials to Oudomxay Province, Lao PDR

นิวัฒน์ชัย ใจคำ[1], หฤทัยรัตน์ จันต๊ะคาด[1], ชลิดา อุดมรักษาสกุล[2] และ ชลากร อุดมรักษาสกุล[3*]
Niwatchai Jaikham[1], Harutairat Jantakard[1], Chalida Udomraksasakul[2]
and Chalakorn Udomraksasakul[3*]

Received: 18 March 2024 ; **Revised**: 26 May 2024 ; **Accepted**: 18 June 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการขนส่งทางเรือและการขนส่งทางบก จากบริษัทกรณีศึกษาไปยัง สปป.ลาว (แขวงอุดมไซ) และประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า โดยประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของสถานประกอบการภาคอุตสาหกรรม และกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) ในการดำเนินงานวิจัย โดยใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจ 5 เกณฑ์ คือ (1) ต้นทุนต่อหน่วยสินค้า (2) ระยะเวลาการขนส่ง (3) ความสามารถในการขนส่ง (4) ความปลอดภัยในการขนส่ง และ (5) ความถี่ในการขนส่ง บน 2 เส้นทางการขนส่งคือ (1) ทางเรือ (2) ทางถนน ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนต้นทุนการขนส่งทางถนนมีค่าสูงกว่าการขนส่งทางเรือ ร้อยละ 6.30 บริษัทกรณีศึกษาควรเลือกการขนส่งสินค้าการขนส่งทางเรือ เพราะสามารถตอบสนองต่อเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ได้ถึงร้อยละ 77.2

คำสำคัญ: ต้นทุนการขนส่ง, กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น, การเลือกเส้นทางขนส่ง

Abstract

This study aims to evaluate the expenses of land and sea transportation from the case study company to Lao PDR (Oudomxay province) and identify the most cost-effective modes of transportation to meet the target market's demands. Utilizing the Industrial Logistics Performance Index (ILPI) and the Analytic Hierarchy Process (AHP), the research was carried out utilizing the following five criteria: (1) unit cost ; (2) transit time ; (3) transportability ; (4) transportation safety ; and (5) transportation frequency. The analysis indicates that the cost of shipping freight by road is more expensive than shipping by sea freight. Case study companies should choose to ship by sea freight since they can respond to all 5 choices criteria up to 77.2%.

Keywords: Transportation costs, Analysis Hierarchy Process (AHP), Transportation route selection

[1] หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
[2] หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[3] หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai
[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
[3] Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
* Correspondent author: Email: chalakorn.u@rmutp.ac.th

บทนำ

การวิเคราะห์การบริหารจัดการขนส่งเป็นกระบวนที่สำคัญในการบริหารจัดการธุรกิจวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากมีผลต่อกำไรและการดำเนินธุรกิจขององค์กรที่มีความสำคัญมาก การทราบค่าต้นทุนการขนส่งอย่างถูกต้องสามารถช่วยในการวางแผนกลยุทธ์การจัดส่งที่มีประสิทธิภาพและทำให้องค์กรสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนทั่วไปและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจ (Marufuzzamanet *et al*., 2015) การเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการประสบความสำเร็จของการจัดส่ง สามารถช่วยลดต้นทุนการขนส่ง ลดเวลาที่ใช้ในการส่งมอบสินค้า และยังเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า ดังนั้นการวิเคราะห์และการวางแผนเส้นทางการขนส่งเป็นกระบวนที่ที่สำคัญในการบริหารจัดการทรัพยากร (Bast *et al*., 2016)

บริษัทกรณีศึกษา จำกัด ตั้งอยู่ที่อำเภอเชียงของจังหวัดเชียงราย ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการจำหน่ายวัสดุก่อสร้างทั้งในประเทศ คืออำเภอเชียงของและพื้นที่ใกล้เคียงและต่างประเทศ ได้แก่ สปป.ลาว ในการขนส่งวัสดุก่อสร้างไปจำหน่ายยังแขวงอุดมไซ จะใช้เส้นทางการขนส่ง 2 เส้นทาง คือ การขนส่งทางเรือ เส้นทางท่าเรือบั๊ค อำเภอเชียงของ-ปากอู แขวงอุดมไซ และการขนส่งทางถนน (R3A) เส้นทางอำเภอเชียงของ-แขวงบ่อแก้ว-แขวงหลวงน้ำทา-แขวงอุดมไซ จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นพบว่าบริษัทกรณีศึกษาไม่ได้ศึกษาต้นทุนการขนส่ง จึงทำให้ไม่ทราบต้นทุนการขนส่งที่แท้จริง รวมทั้งไม่ได้มีการประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งที่มีความเหมาะสม จึงทำให้การขนส่งสินค้าของบริษัทฯ ขาดประสิทธิภาพ และอาจส่งผลต่อผลกำไรและประสิทธิภาพการแข่งขันกับผู้ค้ารายอื่น

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของสถานประกอบการภาคอุตสาหกรรม (Industrial Logistics Performance Index: ILPI) (Rezaei *et al*., 2018) ในการเปรียบเทียบศักยภาพการขนส่ง เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการขนส่งทางเรือและทางถนนจากบริษัทกรณีศึกษา จำกัด ไปยังสปป.ลาว (แขวงอุดมไซ) และประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process: AHP) (Singh *et al*., 2016) ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งในการประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างที่มีความเหมาะสมและยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับผู้ค้ารายอื่น

วรรณกรรมและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

1. ตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์

การกำหนดตัวชี้วัดความสามารถด้านโลจิสติกส์ถูกจัดทำขึ้นทั้งในระดับสากล ระดับชาติ และระดับองค์กร เช่น ตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ (Logistic Performance Index: LPI) โดยธนาคารโลก ตัวชี้วัดสมรรถนะของโซ่อุปทานด้วยแบบจำลอง SCOR (Supply Chain Operating Reference Model: SCOR Model) โดยองค์กร Supply Chain Council และตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของสถานประกอบการภาคอุตสาหกรรม(Industrial Logistics Performance Index: ILPI) โดยสำนักโลจิสติกส์ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เป็นต้น เพื่อใช้เป็นเกณฑ์เทียบวัดผลการดำเนินงานด้านโลจิสติกส์ของผู้ประกอบการในกลุ่มอุตสาหกรรมเดียวกัน และส่งเสริมให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาองค์กรสู่มาตรฐานด้านโลจิสติกส์ ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า ได้ทันเวลาและลดต้นทุนรวมด้านโลจิสติกส์ โดยสามารถวัดประสิทธิภาพการดำเนินงานครอบคลุมกิจกรรมด้านโลจิสติกส์ทั้ง 9 กิจกรรม โดยพิจารณาใน 3 มิติ ได้แก่

1. มิติด้านต้นทุน (Cost Dimension) แสดงถึงสัดส่วนต้นทุนของกิจกรรมโลจิสติกส์เปรียบเทียบกับยอดขายประจำปีของกิจการ สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือควบคุมต้นทุนส่วนเกินที่ไม่จำเป็นได้โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพสินค้าหรือการบริการ

2. มิติด้านเวลา (Time Dimension) ประกอบด้วยตัวชี้วัดที่ใช้ข้อมูลระยะเวลาของการเคลื่อนย้ายสินค้าที่อยู่นอกเหนือจากช่วงของกระบวนการผลิต และระยะเวลาการเคลื่อนย้ายของข้อมูลที่เริ่มตั้งแต่การรับข้อมูลและสิ้นสุดที่การส่งมอบข้อมูลให้แก่ลูกค้าหรือผู้ใช้สินค้าหรือบริการลำดับถัดไป

3. มิติด้านความน่าเชื่อถือ (Reliability Dimension) ประกอบด้วยตัวชี้วัดที่ใช้วัดความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับการส่งมอบสินค้าและข้อมูล โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ตัวชี้วัดด้านการส่งมอบตรงเวลา (On-time) และตัวชี้วัดด้านการส่งมอบครบจำนวน (In-full) (Division of Logistics, 2017)

2. กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process: AHP) ใช้เพื่อแปลงลำดับของรายการจัดอันดับเป็นค่าตัวเลขที่สามารถจัดการและเปรียบเทียบได้อย่างเหมาะสม AHP เป็นเครื่องมือการตัดสินใจขั้นสูงที่เปรียบเทียบความเป็นไปได้ซึ่งยากที่จะ

คำนวณค่าออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) Decomposition: การกำหนดและจำแนกองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อจัดรูปแบบกระบวนการตัดสินใจให้เป็นโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น

2) Prioritization: การกำหนดความสำคัญของแต่ละองค์ประกอบการตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นของโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น โดยเปรียบเทียบน้ำหนักความสำคัญซึ่งได้จากผลการสัมภาษณ์ผู้ตัดสินใจแต่ละคน

3) Synthesis: AHP จะประยุกต์ใช้ “หลักการขององค์ประกอบลำดับชั้น” ในการรวมน้ำหนักความสำคัญของแต่ละค่าของปัจจัย การวัดค่าน้ำหนักแต่ละทางเลือกตามความสำคัญสัมพัทธ์รวม เพื่อนำไปพิจารณาหาทางเลือกที่ดีที่สุด Saaty (1980)

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) มีเป็นการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์เป็นหลัก กล่าวคือ การแปลงสิ่งที่ไม่สามารถวัดค่าในเชิงปริมาณให้สามารถพิจารณาในเชิงปริมาณได้ โดยการกำหนดมาตราส่วนในการพิจารณา เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้แบบมีเหตุผล โดยกำหนดเป้าหมายและสร้างโครงสร้างของปัญหาที่ต้องการพิจารณาออกมาเป็นแผนภูมิลำดับชั้น (Hierarchy) ตามลำดับชั้นของเกณฑ์ ซึ่งทำให้สามารถมองเห็นองค์ประกอบของปัญหาโดยรวมและเปรียบเทียบปัญหาอย่างเป็นเหตุเป็นผลในทุกปัจจัยที่พิจารณา ส่งผลให้ผลการตัดสินใจมีความถูกต้องรัดกุมมากขึ้น ดังกล่าวจึงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและมีความสะดวกในการจัดลำดับความสำคัญ และช่วยทำให้เกิดการตัดสินใจที่ดีในสถานการณ์ที่ต้องมีการเลือก สามารถใช้ได้กับการตัดสินใจที่มีความยุ่งยากซับซ้อนโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบคู่ และเป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการตัดสินใจอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน (Sopadang, 2009)

3. ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Watanarawee *et al*., (2018) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการแข่งขันและวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันของความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจการค้าข้ามแดนจังหวัดเชียงราย จำนวน 295 ราย โดยวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์ ทั้ง 3 มิติ พบว่า ประสิทธิภาพในการจัดการโลจิสติกส์ มิติด้านความน่าเชื่อถือได้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบมากที่สุดอยู่ที่ 0.63 แสดงให้เห็นว่า มีความสามารถส่งมอบสินค้า ได้ครบถ้วนอย่างสม่ำเสมอ เชื่อถือได้ ลูกค้าได้รับสินค้าตามระยะเวลาที่ต้องการ ความเสียหายและการคืนสินค้ามีปริมาณคงที่ ซึ่งมากกว่ามิติด้านต้นทุน และมิติด้านเวลา ที่มีค่าอยู่ที่ 0.50 และ 0.39 ตามลำดับ

Martí *et al*., (2017) ได้ศึกษาโดยประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ (LPI) เพื่อประเมินประสิทธิภาพขององค์กร และคำนวณดัชนีสังเคราะห์ของประสิทธิภาพโลจิสติกส์โดยรวม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพโลจิสติกส์ของประเทศ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ขึ้นอยู่กับรายได้ และพื้นที่ทางภูมิศาสตร์เป็นส่วนใหญ่ ประเทศที่มีรายได้สูงอยู่ในกลุ่มประเทศที่มีประสิทธิภาพโลจิสติกส์โดยรวมดีที่สุด

Onsel *et al*., (2019) ได้ทำงานวิจัยเพื่อเสนอวิธีการในการพัฒนาการกำหนดนโยบายในการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของประเทศ โดยวิเคราะห์ผลกระทบของ Global Competitiveness Index (GCI) ต่อประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ที่วัดโดย Logistics Performance Index (LPI) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ารัฐบาลควรให้ความสำคัญกับความพร้อมทางเทคโนโลยี การศึกษา และการฝึกอบรมระดับอุดมศึกษา นวัตกรรมเพื่อเอื้อในการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ของประเทศ

Jayathilaka *et al*., (2022) ได้ตรวจสอบผลกระทบของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP) และดัชนีประสิทธิภาพโลจิสติกส์ (LPI) ต่อการค้าระหว่างประเทศของประเทศต่างๆ ในแต่ละทวีปและทั่วโลก รวม 142 ประเทศ โดยใช้เทคนิคการถดถอยแผงและเลือกแบบจำลองเอฟเฟกต์สุ่ม (RE) และการทดสอบตัวคูณ Breusch-Pagan Lagrange ผลการวิจัยพบว่า LPI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการส่งออกสุทธิทั่วโลกโดยเฉพาะในทวีปเอเชีย ยุโรป และโอเชียเนีย ภาพรวมของผลกระทบของ LPI และ GDP ต่อการส่งออกสุทธิ ซึ่งจะช่วยรัฐบาลในการกำหนดและแก้ไขกลยุทธ์ นโยบายเพื่อเร่งการเติบโตของการส่งออก

Solangi *et al*., (2021) ได้เสนอกลยุทธ์ เพื่อเอาชนะอุปสรรคด้านพลังงานหมุนเวียน ด้วยวิธี AHP ซึ่งผลพบว่า เศรษฐกิจและการเงิน การเมืองและนโยบาย และ ตลาด ได้รับการจัดอันดับให้เป็นอุปสรรคที่สำคัญที่สุดในการปรับใช้เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน และวิธี Fuzzy TOPSIS ให้ผลว่า เงินอุดหนุนอัตราภาษีป้อนเข้าและนโยบายโดยตรง การเปิดใช้งานและการบูรณาการเป็นกลยุทธ์ที่เป็นไปได้มากที่สุดในการนำเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนไปใช้ในประเทศปากีสถาน

Singh *et al*., (2016) ได้ใช้ AHP ในการจัดอันดับโครงการไฟฟ้าพลังน้ำตามขนาดกำลังการผลิต โดยพิจารณาจากปัญหาทางสังคมเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม พบว่าโครงการไฟฟ้าพลังน้ำขนาดกลางเหมาะสมที่สุด ตามมาด้วยโครงการไฟฟ้าพลังน้ำขนาดใหญ่ ในการจัดลำดับความสำคัญดังกล่าวจะช่วยในการพัฒนากลยุทธ์การพัฒนาโครงการไฟฟ้าพลังน้ำที่เป็นนวัตกรรมสำหรับประเทศและจะช่วยทบทวนกลยุทธ์

ล่าสุดอีกด้วย และอาจเป็นประโยชน์สำหรับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และผู้มีอำนาจตัดสินใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับโครงการไฟฟ้าพลังน้ำ

Thongphon & Narit (2021) ได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาด่านการค้าข้ามพรมแดนไทยระหว่างไทยและมาเลเซีย โดยใช้วิธีการเชิงคุณภาพ ผลการศึกษายังพบว่า ด่านการค้าข้ามพรมแดนของไทยมีปัญหาหลายประการ เช่น การขาดแคลนอุปกรณ์สำหรับผู้ตรวจการ การที่เจ้าหน้าที่ไม่ได้รับรายละเอียดงาน และความจำเป็นในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติม รัฐบาลไทยควรเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกทั้งหมดและจัดให้มีการฝึกอบรมเพื่อให้มีความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับกฎหมาย

Tao Z. (2022) ได้ใช้เทคนิคเชิงปริมาณในการวิเคราะห์การค้าสินค้าเกษตรระหว่างไทยกับจีน 4 วิธี รวมถึงการคำนวณดัชนี Grubel-Lloyd แสดงดัชนีความได้เปรียบเชิงเปรียบเทียบ (RCA) ดัชนีความเข้มทางการค้า (TII) และดัชนีเสริมการค้า (TCI) ผลลัพธ์วิธีที่ 1 พบว่าการค้าสินค้าเกษตรของไทยมีความได้เปรียบในการแข่งขันมากกว่าจีน (RCA เฉลี่ย 3 ปี = 1.69 > 1.25) ผลลัพธ์วิธีที่ 2 พบว่าสินค้า 03, 07, 13 และ 14 ของการส่งออกของจีนและการนำเข้าของไทยมีความสมบูรณ์ที่แข็งแกร่ง รายการที่ 10, 11, 17 และ 19 ของการส่งออกของไทยและการนำเข้าของจีนมีความสมบูรณ์ ผลลัพธ์วิธีที่ 3 พบว่าปัจจัยบวกต่อกระแสการค้าทวิภาคีอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์วิธีที่ 4 พบว่ารายการ 06, 07, 12, 19, 20 และ 21 ได้เปรียบในการค้าภายในอุตสาหกรรม และรายการ 09, 10, 13 และ 18 ได้เปรียบในการค้าระหว่างอุตสาหกรรม

Pornpimol C. *et al.*, (2018) ได้ศึกษากระบวนการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าและออกแบบเส้นทางการขนส่งประเภทวัสดุก่อสร้าง โดยนำเสนออัลกอรีทึมที่พัฒนามาจากวิธีการแบบประหยัด (Saving Algorithm) และวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการจัดเส้นทางที่มีหลากหลายเส้นทาง ผลการศึกษาพบว่าเส้นทางเดินรถที่จัดโดยวิธีการเชิงพันธุกรรมมีระยะทางการขนส่งน้อยกว่าวิธีการดำเนินการในปัจจุบันถึงร้อยละ 32.9 และมีค่าใช้จ่ายที่ลดลงร้อยละ 45.23

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

การวิเคราะห์ต้นทุนในการขนส่งทางเรือและทางถนน และการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างจากบริษัทกรณีศึกษา จำกัด ไปยัง สปป.ลาว (แขวงอุดมไซ) มีขั้นตอนการดำเนินงานดัง Figure 1

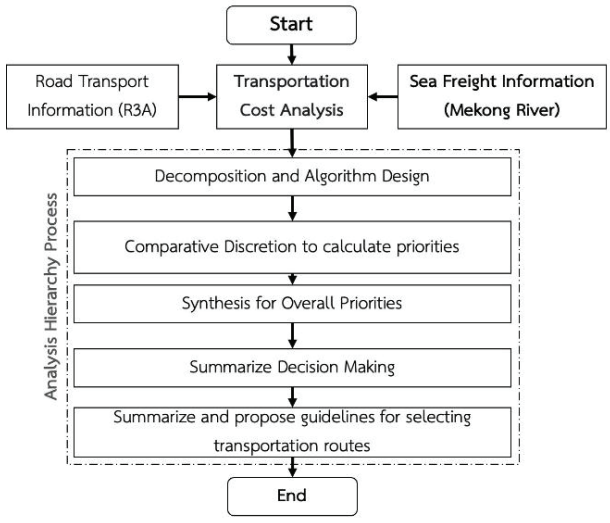


Figure 1 Steps for analyzing transportation and decision-making for selecting transportation routes.

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์ ทั้ง 3 มิติ ได้แก่

1. มิติด้านต้นทุน

คณะผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ในส่วนของ สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$P = \left(\frac{C_1+C_2+C_3+C_4}{V}\right) \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

P คือ สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย

C_1 คือ ต้นทุนค่าขนส่ง

C_2 คือ ต้นทุนค่าแรงพนักงาน

C_3 คือ ค่าพิธีการศุลกากร

C_4 คือ ค่าธรรมเนียมเจ้าท่า

V คือ มูลค่ายอดขาย

2. มิติด้านเวลา

คณะผู้วิจัยจะศึกษาข้อมูลด้านเวลาการขนส่งในช่วงที่สินค้าออกจากประเทศไทยไปแขวงอุดมไซทั้ง 2 เส้นทาง คือ การขนส่งทางเรือ และการขนส่งทางถนน

3. มิติด้านความน่าเชื่อถือ

คณะผู้วิจัยจะรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์เจ้าของบริษัทกรณีศึกษา คือข้อมูลความน่าเชื่อถือ หรือความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นจากการขนส่งในแต่ละเส้นทาง นำมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ และผลกระทบ/ความรุนแรง ดัง Table 1 จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับระดับความเสี่ยงจากตารางเมทริกซ์ ดัง Table 2

Table 1 Risk assessment matrix.

Risk Assessment Matrix			Likelihood				
			Very low	Low	Moderate	High	Very high
			1	2	3	4	5
Impact	Very high	5	5	10	15	20	25
	High	4	4	8	12	16	20
	Moderate	3	3	6	9	12	15
	Low	2	2	4	6	8	10
	Very low	1	1	2	3	4	5
			Risk				

Table 2 Risk level comparison matrix.

Risk level	Level	Meaning
Very high	17-25	Levels that are unacceptable require immediate risk management to bring them to an acceptable level.
High	10-16	Unacceptable levels must be managed to bring the risk to an acceptable level.
Moderate	4-9	Levels that are tolerable but need control to prevent the risk from escalating to an unacceptable level.
Low	1-3	Acceptable levels, without the need for risk control or additional management.

2. การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

1. การแยกปัญหาและการสร้างลำดับชั้น

ในการจัดระบบการแบ่งลำดับชั้น ผู้วิจัยได้กำหนดระดับชั้นที่สูงที่สุดเรียกว่าวัตถุประสงค์โดยรวม (Overall Objective) คือ เส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมที่สุด โดยเจ้าของบริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้กำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ ทั้งหมด 5 เกณฑ์ ได้แก่ ต้นทุนต่อหน่วยสินค้า (Cost: C) ระยะเวลาการขนส่ง (Time: T) ความสามารถในการขนส่ง (Efficiency: E) ความปลอดภัยในการขนส่ง (Safety: S) และความถี่ในการขนส่ง (Frequency: F) ระดับล่างสุดของลำดับชั้นคือทางเลือกของการตัดสินใจ (Decision Alternatives) ซึ่งมีทั้งหมด 2 ทางเลือกคือ การขนส่งทางเรือ (W1) และการขนส่งทางถนน (W2) ซึ่งทั้ง 2 เส้นทาง เจ้าของบริษัทกรณีศึกษามองว่าเป็นเส้นทางที่สามารถขนส่งสินค้าให้กับลูกค้าได้อย่างปลอดภัยและมีความคุ้มค่าในการขนส่งดัง Figure 2

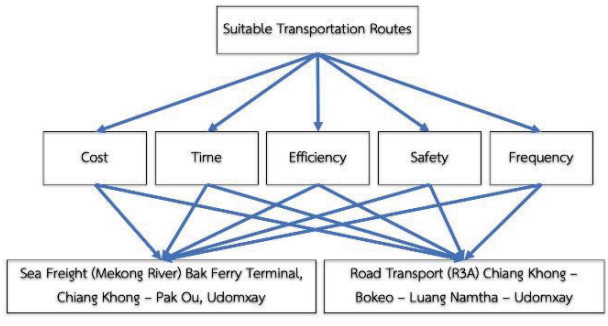


Figure 2 Hierarchy structure of decision-making for selecting construction material transportation routes.

ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์

1. มิติด้านต้นทุน

ในด้านต้นทุนได้ใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยของต้นทุนย้อนหลัง 2 ปี ตั้งแต่ปี 2564-2565 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย การขนส่งทางเรือ อยู่ที่ร้อยละ 25.01 ซึ่งวิเคราะห์ได้ดังนี้

ต้นทุนค่าขนส่ง (C_1) = 3,705,000 บาท/ปี

ต้นทุนค่าแรงพนักงาน (C_2) = 247,000 บาท/ปี

ค่าธรรมเนียมเจ้าท่า (C_3) = 41,167 บาท/ปี

ค่าพิธีการศุลกากร (C_4) = 21,600 บาท/ปี

มูลค่ายอดขาย (V) = 16,055,000 บาท/ปี

$$P = \left(\frac{3{,}705{,}000 + 247{,}000 + 41{,}167 + 21{,}600}{16{,}055{,}000}\right) \times 100$$

= 25.01

สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย การขนส่งทางถนน อยู่ที่ร้อยละ 31.31 ซึ่งวิเคราะห์ได้ดังนี้

ต้นทุนค่าขนส่ง (C_1) = 7,686,900 บาท/ปี

ต้นทุนค่าแรงพนักงาน (C_2) = 474,500 บาท/ปี

ค่าพิธีการศุลกากร (C_3) = 1,496,500 บาท/ปี

มูลค่ายอดขาย (V) = 30,842,500 บาท/ปี

$$P = \left(\frac{7{,}686{,}900 + 474{,}500 + 1{,}496{,}500}{30{,}842{,}500}\right) \times 100$$

= 31.31

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย การขนส่งทางถนน มีค่าสูงกว่าสัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย การขนส่งทางเรือ อยู่ที่ร้อยละ 6.30

2. มิติด้านเวลา

เส้นทางการขนส่งทางเรือ มีระยะทาง 390 กิโลเมตร ใช้เวลาเดินทางประมาณ 48 ชั่วโมง การขนส่งทางถนน มีระยะทาง 321 กิโลเมตร ใช้เวลาเดินทางประมาณ 7 ชั่วโมง 45 นาที เห็นได้ว่าการขนส่งทางเรือใช้เวลาเดินทางที่นานกว่าการขนส่งทางถนน

3. มิติด้านความน่าเชื่อถือ

จากข้อมูลการสัมภาษณ์เจ้าของบริษัทกรณีศึกษาพบว่า ความเสี่ยงในการขนส่งทางถนน ได้แก่ (1) ความเสี่ยงจากอุบัติเหตุนอกประเทศไทย เพราะไม่ชินเส้นทางของพนักงานขับรถ (2) ความเสี่ยงจากการจัดเก็บภาษีที่ไม่แน่นอนใน สปป.ลาว ส่วนความเสี่ยงจากการขนส่งทางเรือ คือ (3) ความเสี่ยงที่สินค้าจะเสียหายระหว่างการขนถ่ายสินค้าหลายครั้ง (4) ความเสี่ยงจากอุบัติเหตุ เพราะกระแสน้ำแรงในฤดูฝน ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ และผลกระทบ/ความรุนแรงมีดังนี้

3.1 ความเสี่ยงจากอุบัติเหตุนอกประเทศไทย เพราะไม่ชินเส้นทางของพนักงานขับรถ พบว่า มีความเป็นไปได้สูง และผลกระทบอยู่ในระดับสูง ค่าคะแนนระดับความเสี่ยงเท่ากับ 16

3.2 ความเสี่ยงจากการจัดเก็บภาษีที่ไม่แน่นอนใน สปป.ลาว พบว่า มีความเป็นไปได้สูง และผลกระทบอยู่ในระดับปานกลาง ค่าคะแนนระดับความเสี่ยงเท่ากับ 12

3.3 ความเสี่ยงที่สินค้าจะเสียหายระหว่างการขนถ่ายสินค้าหลายครั้ง พบว่า มีความเป็นไปได้สูง และผลกระทบอยู่ในระดับปานกลาง ค่าคะแนนระดับความเสี่ยงเท่ากับ 12

3.4 ความเสี่ยงจากอุบัติเหตุ เพราะกระแสน้ำแรงในฤดูฝน พบว่า มีความเป็นไปได้ปานกลาง และผลกระทบอยู่ในระดับสูง ค่าคะแนนระดับความเสี่ยงเท่ากับ 12

ผลการเปรียบเทียบกับระดับความเสี่ยงตารางเมทริกซ์ พบว่า การขนส่งทางถนนมีระดับความเสี่ยงมากกว่าการขนส่งทางเรือ และอยู่ในระดับความเสี่ยงสูง ควรได้รับการจัดการโดยเร็ว และการขนส่งทางถนนยังมีความเสี่ยงในเรื่องของความไม่แน่นอนในการจัดเก็บภาษีของ สปป.ลาว เนื่องจากการจัดเก็บภาษีของแต่ละท้องที่ขึ้นอยู่กับเจ้าแขวง ซึ่งไม่สามารถระบุเป็นจำนวนเงินที่แน่นอนได้

2. ผลการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

1. การให้ดุลยพินิจเชิงเปรียบเทียบเพื่อคำนวณลำดับความสำคัญ

คณะผู้วิจัยได้ป้อนข้อมูลค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจที่ประเมินจากเจ้าของบริษัทกรณีศึกษา ดัง Table 3 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าลำดับที่ 4 ความปลอดภัยในการขนส่ง ไม่สามารถระบุตัวเลขเพื่อนำมาคำนวณค่าน้ำหนักในการใช้เกณฑ์การตัดสินใจได้ ผู้วิจัยต้องใช้ข้อมูลใน Table 4 เพื่อระบุคะแนนที่เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพให้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ แล้วระบุค่าในลำดับที่ 4 ดังแสดงใน Table 5

Table 3 Baseline data used for evaluating decision-making criteria.

Symbol	Criteria	Alternative (Route)		Unit
		W1	W2	
C	Cost	1,625	2,035	Baht / Ton
T	Time	48	7.75	Hour
E	Efficient	30	13	Ton / Round
S	Safety	Good	Poor	-
F	Frequency	23	30	Round / Week

Table 4 Data on criteria scoring.

Likert Scale	Score
Excellent	5
Very Good	4
Good	3
Fair	2
Poor	1

Table 5 Converting basic data into scores that can be used to consider decision criteria.

Symbol	Criteria	Alternative (Route)		Unit
		W1	W2	
C	Cost	1,625	2,035	Baht/Ton
T	Time	48	7.75	Hour
E	Efficient	30	13	Ton / Round
S	Safety	3	1	-
F	Frequency	23	30	Round / Week

1.1 การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise Comparisons)

คณะผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบเกณฑ์ในการจัดสินใจในแต่ละคู่ ดัง Table 6 เมื่อทำการจับคู่เพื่อทำการเปรียบเทียบแล้วจะใช้มาตราส่วนการเปรียบเทียบคือ มาตราส่วนมูลฐาน AHP 1-9 ดัง Table 7 โดยทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ ดังTable 8

Table 6 Pairwise Comparisons. (Saaty, 1980)

Criteria	C	T	E	S	F
C	1	C/T	C/E	C/S	C/F
T	T/C	1	T/E	T/S	T/F
E	E/C	E/T	1	E/S	E/F
S	S/C	S/T	S/E	1	S/F
F	F/C	F/T	F/E	F/S	1

Table 7 Decision criteria. (Saaty, 1980)

(Verbal Judgement)	Decision criteria
(Equal Importance)	1
(Moderate Importance)	3
(Strong Importance)	5
(Very Strongly Importance)	7
(Extreme Importance)	9
(Mean)	2, 4, 6, 8

Table 8 AHP basic scale data of each pair of decision-making criteria.

Criteria	Criteria					Total
	C	T	E	S	F	
C	1	1/7	1/3	1	1/3	2.810
T	7	1	1/3	3	1/3	11.667
E	3	3	1	7	1	15.000
S	1	1/3	1/7	1	1/7	2.619
F	3	3	1	7	1	15.000

1.2 การคำนวณค่าน้ำหนัก (Weight Calculation)

เป็นการลำดับความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจให้ความสำคัญกับเกณฑ์การพิจารณาทางเลือกแต่ละทาง ใน Table 9 พบว่า เจ้าของบริษัทกรณีศึกษาได้ให้ความสำคัญด้านความปลอดภัยในการขนส่งมากที่สุด โดยได้น้ำหนักอยู่ที่ 2.713 คิดเป็น ร้อยละ 40.4 รองลงมาเป็นด้านต้นทุนต่อหน่วยสินค้า ได้น้ำหนักอยู่ที่ 2.290 คิดเป็น ร้อยละ 34.1 จากนั้นคำนวณค่าน้ำหนักระหว่างเกณฑ์การตัดสินใจเปรียบเทียบกับทางเลือกซึ่งแสดงได้ดัง Table 10 ถึง Table 14 และเมื่อคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจเปรียบเทียบกันในแต่ละคู่ ดัง Table 15

Table 9 Weight Calculation.

Criteria	Criteria					Total
	C	T	E	S	F	
C	1	1/7	1/3	1	1/3	2.810
T	7	1	1/3	3	1/3	11.667
E	3	3	1	7	1	15.000
S	1	1/3	1/7	1	1/7	2.619
F	3	3	1	7	1	15.000
Weight	2.290	0.844	0.437	2.713	0.437	6.721
Percent	0.341	0.126	0.065	0.404	0.065	1.000

Table 10 Average Cost.

Average cost	W1	W2	Weight	Percent
W1	1.000	7.000	2.646	0.875
W2	0.143	1.000	0.378	0.125
Total			**3.024**	**1.000**

Table 11 Average Time.

Average Time	W1	W2	Weight	Percent
W1	1.000	0.200	0.447	0.167
W2	5.000	1.000	2.236	0.833
Total			**2.683**	**1.000**

Table 12 Average Efficient.

Average Efficient	W1	W2	Weight	Percent
W1	1.000	7.000	2.646	0.875
W2	0.143	1.000	0.378	0.125
Total			**3.024**	**1.000**

Table 13 Average Safety.

Average Safety	W1	W2	Weight	Percent
W1	1.000	7.000	2.646	0.875
W2	0.143	1.000	0.378	0.125
Total			**3.024**	**1.000**

Table 14 Average Frequency.

Average Frequency	W1	W2	Weight	Percent
W1	1.000	0.200	0.447	0.167
W2	5.000	1.000	2.236	0.833
Total			**2.683**	**1.000**

Table 15 Weighted comparison of decision criteria within each decision criterion.

Criteria	Criteria					Total
	C	T	E	S	F	
C	0.356	0.051	0.119	0.356	0.119	1.000
T	0.600	0.086	0.029	0.257	0.029	1.000
E	0.200	0.200	0.067	0.467	0.067	1.000
S	0.382	0.127	0.055	0.382	0.055	1.000
F	0.200	0.200	0.067	0.467	0.067	1.000
Average	**0.348**	**0.133**	**0.067**	**0.386**	**0.067**	**1.000**

1.3 การตรวจสอบความสอดคล้องของดุลยพินิจ (Consistency Check) สามารถวัดระดับความสอดคล้องของดุลยพินิจแต่ละชุดได้ จากการคำนวณอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ในแต่ละเมทริกซ์ โดยทั่วไปค่าวิกฤตจะอยู่ที่ 0.1 แสดงว่า ดุลยพินิจนั้นไม่น่าเชื่อถือช่วงที่ยอมรับได้ ค่าของ CR ขึ้นอยู่กับขนาดของเมทริกซ์ งานวิจัยนี้มีเกณฑ์การตัดสินใจอยู่ที่ 5 เกณฑ์ ดังนั้นจึงเป็นเมทริกซ์มีขนาด 5x5 ค่า CR จึงไม่ควรเกิน 0.1 การคำนวณค่า CR สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดยที่ = 5 ใช้ค่า RI = 1.12 ในการคำนวณค่า CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{2}$$

โดยที่

CR = ค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)

CI = ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index)

RI = ดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Random Index) พิจารณาจาก Table 16

Table 16 Random Index. (Saaty, 1980)

	RI
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) สามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$CI = \frac{\lambda - n}{n-1} \quad (3)$$

โดยที่

n = ขนาดของสแควร์เมริกซ์ หรือจำนวนของเกณฑ์ ซึ่งเมทริกซ์มีขนาด 5x5 ค่าของ n จึงมีค่าเท่ากับ 5

$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{k_i}{r_i}}{n}$ = หรือค่าเฉลี่ยของผลรวมต่อค่าเฉลี่ย

ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของดุลยพินิจสามารถแสดงได้ดัง Table 17 เมื่อพิจารณาค่า CR แล้วพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.094 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1 แสดงว่า ดุลยพินิจนี้มีความน่าเชื่อถืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สามารถนำข้อมูลการพิจารณาดังกล่าวไปคำนวณเพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกต่อได้

Table 17 Consistency Check.

Criteria	Criteria					Sum for average
	C	T	E	S	F	
C	0.348	0.929	0.201	0.386	0.201	5.941
T	0.050	0.133	0.201	0.129	0.201	5.371
E	0.116	0.044	0.067	0.055	0.067	5.211
S	0.348	0.398	0.469	0.386	0.469	5.367
F	0.116	0.044	0.067	0.055	0.067	5.211
					=	5.420
					CI =	0.10503
					CR =	**0.094**

2. การสังเคราะห์เพื่อให้ได้ลำดับความสำคัญโดยรวม

พิจารณาจากน้ำหนักที่ให้ความสำคัญของเกณฑ์ที่นำมาพิจารณาในการตัดสินใจ ซึ่งได้จาก Table 9 แล้วนำไปคูณกับน้ำหนักที่ให้ความสำคัญของทางเลือกที่นำมาพิจารณาในการตัดสินใจในแต่ละทางเลือก ซึ่งได้จาก Table ถึง Table 14 ภาพรวมในการคำนวณแสดงดัง Table 18 เมื่อคำนวณค่าน้ำหนักการตัดสินใจพบว่า ทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักในการพิจารณามากที่สุดคือ การขนส่งสินค้าทางเรือ (W1) ซึ่งมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.772 หมายความว่า เจ้าของบริษัทกรณีศึกษา ควรเลือกการขนส่งสินค้าทางเรือ เพราะสามารถตอบสนองต่อเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ได้ถึง 0.772 หรือร้อยละ 77.2 ผลการคำนวณดัง Table 19

Table 18 Suitable choices (Transportation Routes).

Criteria	Percent	Suitable choices (Transportation Routes)	
		(W1)	(W2)
C	0.341	0.90	0.10
T	0.126	0.25	0.75
E	0.065	0.83	0.17
S	0.404	0.90	0.10
F	0.065	0.25	0.75
Total	**100.00**		

Table 19 Ranking of suitable transportation options.

Criteria	Suitable choices	
	(W1)	(W2)
C	0.307	0.034
T	0.031	0.094
E	0.054	0.011
S	0.363	0.040
F	0.016	0.049
Weight	**0.772**	**0.228**
Ranking	1	2

3. สรุปผลการตัดสินใจ

เจ้าของบริษัทกรณีศึกษา มีวัตถุประสงค์ในการเลือกเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด 5 เกณฑ์ ได้แก่ ต้นทุนต่อหน่วยสินค้า ระยะเวลาการขนส่ง ความสามารถในการขนส่ง ความปลอดภัยในการขนส่ง และความถี่ในการขนส่ง โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าในการลงทุน ความปลอดภัยของสินค้าที่จะส่งถึงมือลูกค้าแล้วทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจในสินค้าและบริการ ทางเลือกของการตัดสินใจ มีทั้งหมด 2 ทางเลือกคือ การขนส่งทางเรือ (W1) และการขนส่งทางถนน (W2) ผลการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process: AHP) มีรายละเอียดดังนี้

คะแนนความสำคัญกับเกณฑ์การพิจารณา ใน Table 9 พบว่า การพิจารณาด้านความปลอดภัยในการขนส่งมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 2.713 คิดเป็น ร้อยละ 40.4 รองลงมาเป็นด้านต้นทุนต่อหน่วยสินค้าอยู่ที่ 2.290 คิดเป็นร้อยละ 34.1 จากนั้นคำนวณค่าสัดส่วนความสอดคล้อง มีค่าเท่ากับ 0.094 ซึ่งน้อยกว่า 0.1 แสดงว่า ดุลยพินิจนี้มีความน่าเชื่อถืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สามารถนำไปคำนวณเพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกต่อได้ เมื่อคำนวณค่าน้ำหนักใจการตัดสินใจแล้วพบว่า การขนส่งทางเรือ (W1) มีค่าน้ำหนักในการพิจารณามากที่สุดอยู่ที่ 0.772 หมายความว่า หากเจ้าของบริษัทกรณีศึกษาจะเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้า โดยพิจารณาจากเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ควรเลือกการขนส่งทางเรือ เส้นทางท่าเรือบ๊ค อำเภอเชียงของ-ปากอู แขวงอุดมไซ เพราะสามารถตอบสนองต่อเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ได้ถึง 0.772 หรือร้อยละ 77.2

อภิปรายผลและสรุป

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์ มิติด้านต้นทุน สัดส่วนต้นทุนการขนส่งต่อมูลค่ายอดขาย ของการขนส่งทางเรืออยู่ที่ร้อยละ 25.01 ของการขนส่งทางถนน อยู่ที่ร้อยละ 31.31 ซึ่งสัดส่วนต้นทุนการขนส่งทางถนนมีค่าสูงกว่าการขนส่งทางเรือ อยู่ที่ร้อยละ 6.30

2. การวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) เจ้าของบริษัทกรณีศึกษาให้ความสำคัญกับเกณฑ์ความปลอดภัยในการขนส่งมากที่สุดซึ่งมีน้ำหนักร้อยละ 40.4 รองลงมาต้นทุนต่อหน่วยสินค้า มีน้ำหนักร้อยละ 34.1 เมื่อคำนวณค่าน้ำหนักใจการตัดสินใจพบว่า การขนส่งทางเรือ (W1) มีค่าน้ำหนักในการพิจารณามากที่สุดอยู่ที่ 0.772 หมายความว่า หากเจ้าของบริษัทกรณีศึกษาจะเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้า โดยพิจารณาจากเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ควรเลือกการขนส่งทางเรือ เส้นทางท่าเรือบ๊ค อำเภอเชียงของ-ปากอู แขวงอุดมไซ เพราะสามารถตอบสนองต่อเกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 5 เกณฑ์ ได้ถึง 0.772 หรือร้อยละ 77.2

3. ผลที่ได้จากการวิจัยเป็นผลจากอิทธิพลของปัจจัยของเกณฑ์การพิจารณาทั้ง 5 เกณฑ์ รวมทั้งผู้ประกอบการให้ความสำคัญกับเกณฑ์ความปลอดภัยในการขนส่งมากที่สุด ส่วนต้นทุนต่อหน่วยสินค้า และระยะเวลาการขนส่ง เป็นปัจจัยที่คาดการณ์ได้ยากเนื่องจากต้นทุนต่อหน่วยสินค้าขึ้นอยู่กับอัตราภาษีและอัตราค่าแรงงานของ สปป.ลาว ระยะเวลาการขนส่งขึ้นอยู่กับสภาพการจราจรและสภาพแวดล้อมในแต่ละฤดูกาลของ สปป.ลาว ในแต่ละช่วงเวลาของปี

4. ผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจสามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการศึกษา เปรียบเทียบเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในเลือกรูปแบบและเส้นทางการขนส่งสินค้าให้เหมาะสมได้ทั้งธุรกิจที่เป็นสินค้าทางการเกษตร ยานพาหนะ หรือสินค้าอุปโภค-บริโภคอื่นๆ ที่มีอุปสงค์และอุปทานร่วมกันระหว่างไทย-สปป.ลาว ไทย-เมียนมาร์ ไทย-จีน และไทย-มาเลเซีย ที่สามารถขนส่งสินค้าได้ทั้งทางถนนและทางเรือ

5. การใช้ AHP เพื่อประเมินทางเลือกเส้นทางการขนส่งวัสดุก่อสร้างไปยัง แขวงอุดมไซ สปป.ลาว เป็นการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการประเมินและวิเคราะห์ความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจที่ส่งผลต่อการเลือกเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งการวิเคราะห์ต้นทุนการขนส่ง ทำให้เกิดการรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับต้นทุนแรงงาน ค่าพิธีการศุลกากร ค่าธรรมเนียมเจ้าท่า การศึกษาเส้นทางและระยะเวลาในการขนส่งสินค้า ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการพัฒนาแผนธุรกิจและกลยุทธ์ในการขนส่งสินค้าไปยังประเทศต่างๆ โดยเฉพาะประเทศที่อยู่ในภูมิภาคใกล้เคียงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบริษัท ซี เค สโตร์ จากัด ที่อนุเคราะห์ข้อมูล อุปกรณ์ สถานที่ และสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยทุกด้าน

เอกสารอ้างอิง

Bast, H. *et al*. (2016). Route Planning in Transportation Networks. *Lecture Notes in Computer Science*, *9220*, 19-80. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49487-6_2.

Division of Logistics.(2017). *Benchmarking Industrial Logistics Performance Index, Supply Chain Performance Index, Logistics Scorecard*. Department of industrial Promotion, Ministry of Industry.

Jayathilaka, R. *et al*. (2022). *Gross domestic product and logistics performance index drive the world trade: A study based on all continents*, PLOS ONE. Edited by W.-W. Sung, 17(3), p. e0264474. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264474.

Martí, L., Martín, J. C., & Puertas, R. (2017). A Dea-Logistics Performance Index. *Journal of Applied Economics*, *20*(1), 169-192. https://doi.org/10.1016/S1514-0326(17)30008-9.

Marufuzzaman, M., Ekşioğlu, S. D., & Hernandez, R. (2015). Truck versus pipeline transportation cost analysis of wastewater sludge. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *74,* (14-30). https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.001.

Onsel Ekici, S. & Kabak, O. & Ulengin, F. (2019). Improving logistics performance by reforming the pillars of Global Competitiveness Index, Transport Policy, 81, pp. 197-207. Available at: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.06.014.

Pornpimol C. *et al*. (2018). Vehicle Routing Problem for Construction Materials. The Journal of KMUTNB, 28(2), 427-238. (in Thai)

Rezaei, J. & van Roekel, W.S., & Tavasszy, L. (2018). *Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method*. *Transport Policy*, *68*, 158-169. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.007.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. International Book Co., New York: McGraw-Hill.

Singh, R. P., & Nachtnebel, H. P. (2016). Analytical hierarchy process (AHP) application for reinforcement of hydropower strategy in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 43-58. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.138.

Solangi, Y.A. & Longsheng, C. & Shah, S.A.A. (2021). Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. Renewable Energy, 173, pp. 209-222. Available at: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.141.

Sopadang, A. (2009) *Administrative Decisions*. Thailand: Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering Chiang Mai University. (in Thai).

Thongphon, P.N.S. & Narit D. (2021). The Development Of Thai's Cross-Border Trade Checkpoint Between Thailand And Malaysia. International Journal of Pharmaceutical Research, 13(1). Available at: https://doi.org/10.31838/ijpr/2021.13.01.819.

Tao, Z. (2022). Competitiveness and complementarity of agricultural products between Thailand and China on a short-term basis. Problems and Perspectives in Management, 20(3), pp. 425-436. Available at: https://doi.org/10.21511/ppm.20(3).2022.34.

Watanarawee, W. & Mingmalairaks, P. (2018). Confirmatory factor analysis of logistics management performance of Chiang Rai's trans-border business. *Suthiparithat Journal*, *33*(105), 26-37. (in Thai)

อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ในการสังเคราะห์ไบโอเซรามิกเตตระแคลเซียมฟอสเฟต

Influence of calcium carbonate and calcium oxide on the synthesis of tetracalcium phosphate bioceramic

ชนรรทน์ กองแก้ว[1], ไกรสร หาริแสง[1] และ ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล[2]*
Chanut Kongkaew[1], Kaisorn Harisaeng[1] and Teerawat Laonapakul[2]*

Received: 24 January 2024 ; **Revised**: 10 April 2024 ; **Accepted**: 13 May 2024

บทคัดย่อ

เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (Tetracalcium phosphate, TTCP) เป็นสารประกอบในกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตที่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของการทำซีเมนต์กระดูก (bone cement) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการสังเคราะห์ TTCP จากสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมกับสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (Dicalcium phosphate dihydrate, DCPD) ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) สารประกอบตั้งต้นและสารประกอบที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดของอนุภาคความต่างศักย์บนผิวอนุภาคและน้ำหนักโมเลกุล (Particle size analysis) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะทางกายภาพโครงสร้างจุลภาค ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้จากสารประกอบตั้งต้น $CaCO_3$ ร่วมกับ DCPD และ CaO ร่วมกับ DCPD ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่สังเคราะห์จากสารประกอบตั้งต้น $CaCO_3$ ร่วมกับ DCPD ปรากฏเป็นเฟสของ TTCP เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแตกต่างกับสารประกอบที่สังเคราะห์จากสารประกอบตั้งต้น CaO ร่วมกับ DCPD ซึ่งปรากฏโครงสร้างผลึกไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate, TCP) ที่มีเฟสของแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp) และ TTCP อย่างไรก็ตามสารประกอบที่ปะปนมายังคงเป็นสารประกอบในกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตที่ถูกนำไปใช้ทางการแพทย์

คำสำคัญ: แคลเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมออกไซด์, เตตระแคลเซียมฟอสเฟต, ไฮดรอกซีอะพาไทต์, ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

Abstract

Tetracalcium phosphate (TTCP) is one of the calcium phosphate materials currently used in medical applications, especially for “Bone Cement”. This research aims to study the synthesis of TTCP using calcium carbonate ($CaCO_3$) or calcium oxide (CaO), combined with dicalcium phosphate dihydrate (DCPD) though a solid-state reaction process. The average particle size and particle size distribution of raw and synthesized compounds were examined using particle size analyzer. The crystalline phase composition was examined using X-ray diffraction. Morphological observation was done using scanning electron microscopy. The experimental results showed that no significant difference in physical characteristics, microstructure, average particle size and particle size distribution of the synthesized compounds from both $CaCO_3$/DCPD and CaO/DCPD. The crystal structure of the compound derived from $CaCO_3$ and DCPD exhibited the major crystal structure of TTCP. It was different, from the synthesized compound derived from CaO and DCPD exhibited the crystal structure of tricalcium phosphate (TCP) with other calcium phosphate

[1] ผู้ช่วยวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
[2] รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
[1] Research assistant, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40000
[2] Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40000
* Corresponding author, E-mail: teerla@kku.ac.th

forms, such as hydroxyapatite and TTCP. However, the coexisting compounds are the calcium phosphate materials that can still be used in biomedical applications.

Keywords: Calcium carbonate, Calcium Oxide, Tetracalcium phosphate, Hydroxyapatite, Tricalcium phosphate

บทนำ

เตตระแคลเซียมฟอสเฟต (Tetracalcium phosphate, TTCP) หรือเรียกว่า Hilgenstokite มีสูตรทางเคมีคือ $Ca_4(PO_4)_2O$ เป็นหนึ่งในวัสดุกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชีวภาพในทางการแพทย์ (Hilgenstock,1883) TTCP เป็นวัสดุชีวภาพกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกเพียงชนิดเดียวที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P molar ratio) เท่ากับ 2.0 ซึ่งมากกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). ที่เท่ากับ 1.67 มีความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายและเอื้อต่อการสร้างเนื้อเยื่อกระดูกใหม่หรือกระตุ้นให้มีเกิดการซ่อมแซมกระดูก (Balhaddad *et al*., 2019 ; Qiu *et al*., 2018) TTCP ในรูปแบบอนุภาคผงถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในซีเมนต์กระดูกสำหรับใช้ในทางการแพทย์ด้านการศัลยกรรมกระดูกและในทางทันตกรรม (Rigo *et al*., 2007)

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการสังเคราะห์ TTCP เพิ่มมากขึ้นโดยสามารถทำการเตรียม TTCP จากสองกระบวนการหลักที่สำคัญได้แก่ วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และวิธีเอนแคปซูเลชันแบบเปียก (Wet encapsulation deposition) อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์โดยวิธีเอนแคปซูเลชันแบบเปียกนั้นเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนและมีต้นทุนสูง (Brown, 1985 ; Chow *et al*., 1996 ; Matsuya *et al*., 1999) ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงเลือกใช้วิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่มีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและต้นทุนต่ำกว่า (Rodriguez-Verde *et al*., 2018) การศึกษาการสังเคราะห์ TTCP ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่ได้รับความสนใจรูปแบบหนึ่งคือ การผสมสารตั้งต้นระหว่างสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) กับสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Dicalcium phosphate anhydrous, DCPA, $CaHPO_4$) หรือสารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต (Dicalcium phosphate Dihydrate, DCPD, $CaHPO_4{\cdot}2H_2O$) ด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P molar ratio) เท่ากับ 2 และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,400-1,500 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ (Rigo *et al*., 2007 ; Brown, 1985 ; Matsuya *et al*., 1999 ; Jeon *et al*., 2011) โดยมีปฏิกิริยาทางเคมีแสดงดังสมการต่อไปนี้:

$$2(CaHPO_4{\cdot}2H_2O) + 2CaCO_3 \xrightarrow{1400\text{-}1500C^\circ} Ca_4(PO_4)_2O + 2CO_2 + 5H_2O \quad (1)$$

และยังมีการศึกษาการเย็นตัวหลังการให้ความร้อนพบว่าอัตราการเย็นตัวที่ช้าจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของ TTPC ไปเป็นสารประกอบเฟสอื่นๆ ปะปนมากับ TTCP ที่สังเคราะห์ได้ด้วย เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต (Tricalcium phosphate, $Ca_3(PO_4)_2$) (Rodriguez-Verde *et al*., 2018) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่มีการศึกษาการสังเคราะห์ TTCP ด้วยสารตั้งต้นอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Jeon และคณะ (Jeon *et al*., 2011) ได้นำ DCPD มาผสมกับสารประกอบแคลเซียมไนเตรตเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate, $Ca(NO_3)_2{*}4H_2O$) ด้วยการสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ 1,500 เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งได้ผลลัพธ์ว่าสามารถที่จะสังเคราะห์ TTCP ได้แต่ก็ยังปรากฏให้เห็นถึงเฟสของ HAp และ CaO ปะปนมากับ TTCP ที่สังเคราะห์ได้ งานวิจัยของ Sargin และคณะ (Sargin *et al*., 1997) ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ TTCP ด้วยสารตั้งต้นระหว่างแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Ammonium dihydrogen phosphate, $NH_4H_2PO_4$) กับ $CaCO_3$ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่าสามารถสังเคราะห์ TTCP ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ที่อุณหภูมิ 1,300-1,350 องศาเซลเซียส

$CaCO_3$ เป็นสารประกอบแคลเซียมที่ผลิตจากหินปูนในอุตสาหกรรมที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone) หรือ หินอ่อน (marble) ที่มีความขาวและความบริสุทธิ์สูง แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบที่สามารถเตรียมได้จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูนในเตาเผาที่อุณหภูมิสูง ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของ $CaCO_3$ และ CaO ที่ไม่เป็นพิษ มีความขาวสูงจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ (Onimisi *et al*., 2016) อุตสาหกรรมก่อสร้างถนนจราจร (Chakraborty *et al*., 1994) ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

ปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาและนำ $CaCO_3$ และ CaO ที่ผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติมาใช้ทดแทน $CaCO_3$ และ CaO ที่ผลิตจากหินปูนในอุตสาหกรรมเพื่อเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพิ่มมากขึ้น (Yadav *et al*., 2021 ; Viriya-empikul *et al*., 2010 ; Mosaddegh *et al*., 2014 ; Beck *et al*., 2010 ; Nagabhushana *et al*., 2017) รวมถึงยังมีการศึกษาการนำ

$CaCO_3$ และ CaO ที่ผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติมาใช้พัฒนาวัสดุชีวภาพกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Laonapakul และคณะ (Laonapakul *et al*., 2021) ได้ทดลองสังเคราะห์ $CaCO_3$ และ CaO จากเปลือกหอยเชอร์รี่ด้วยกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส และนำไปใช้ทดสอบสังเคราะห์ HAp ด้วยการบดเชิงกลร่วมกับวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง งานวิจัยของ Habte และคณะ (Habte *et al*., 2019) ได้ทดลองสังเคราะห์ CaO ขนาดนาโนจากเปลือกไข่ไก่ด้วยกระบวนการ Sol-Gel ก่อนที่จะนำไปเข้ากระบวนการความร้อนด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยของ Sani และคณะ (Sani *et al*., 2020) ได้ทำการทดลองผสม $CaCO_3$ ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-Tricalcium phosphate, β-TCP, β-$Ca_3(PO_4)_2$) และงานวิจัยของ Shavandi และคณะ (Shavandi *et al*., 2015) ได้ทำการสังเคราะห์ β -TCP การใช้ CaO ที่สังเคราะห์จากหอยนางรมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสารประกอบ $CaCO_3$ เป็นสารประกอบแคลเซียมที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์ TTCP ดังแสดงในสมการเคมีที่ (1) และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมการทางเคมียังพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้สารประกอบ CaO มาใช้แทนสารประกอบ $CaCO_3$ ร่วมกับสารประกอบ DCPD ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงดังสมการต่อไปนี้:

$$2CaHPO_4.2H_2O+2CaO \xrightarrow{1400\text{-}1500C^\circ} Ca_4(PO_4)_2O+5H_2O \quad (2)$$

อีกทั้งในการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบการศึกษาการสังเคราะห์ TTCP จากสารประกอบ CaO ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาการสังเคราะห์ TTCP จากสารประกอบ DCPD ร่วมกับสารประกอบ CaO เปรียบเทียบกับการสังเคราะห์ร่วมกับสารประกอบ $CaCO_3$ โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยสารประกอบที่นำมาศึกษาเป็นเกรดการค้าทั้งหมด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และความแตกต่างของการใช้สารประกอบแคลเซียมตั้งต้นที่ต่างกันโดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำสารประกอบ $CaCO_3$ และสารประกอบ CaO ที่สังเคราะห์ได้จากธรรมชาติมาศึกษาในการสังเคราะห์ TTCP หรือสารประกอบกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตอื่นๆ ต่อไป

วิธีการทดลอง

การเตรียมสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟต

สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในในการศึกษานี้ ได้แก่ สารประกอบ DCPD (Dicalcium phosphate dyhydrate, DCPD, ≥ 98%, Sigma-Aldrich, USA) $CaCO_3$ (Calcium Carbonate, $CaCO_3$, ≥ 99%,,CHEMIE PVT.LTD,LOBA.) และ CaO (Calcium Oxide, CaO, ≥ 99%, Finechem Pty Ltd) สารตั้งต้นจะถูกนำไปบดด้วยโกร่งบดยาเป็นเวลา 15 นาที เพื่อทำให้อนุภาคกระจายตัวและนำมาร่อนด้วยตระแกรงขนาด 200 mesh หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ (Laser scattering particle size distribution analyzer)

การสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟต

การสังเคราะห์เตตระแคลเซียมฟอสเฟตในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ด้วยการผสมระหว่าง DCPD กับ $CaCO_3$ และ DCPD กับ CaO ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P molar ratio) เท่ากับ 2.0 ซึ่งเป็นสัดส่วนตามทฤษฎีที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตามสมการที่ (1) และ (2) (อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นจากทั้งสองสมการมีค่าเท่ากับ 1:1) อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ TTCP ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Jeon และคณะ (Jeon *et al*., 2011) โดยสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จะผสมกันด้วยโกร่งบดยาเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปเข้ากระบวนการทางความร้อนด้วยอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ในเตาไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อกระบวนการความร้อนเสร็จสิ้น สารประกอบที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำออกให้เย็นตัวในอากาศนอกเตาในอุณหภูมิห้องในทันที หลังการเย็นตัวในอากาศครบ 24 ชั่วโมง สารประกอบจะถูกลดขนาดอนุภาคด้วยโกร่งบดยาเป็นระยะเวลา 30 นาที และนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบ

การวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นทำการตรวจสอบโดยการใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเลเซอร์ (Laser scattering particle size distribution analyzer, HORIBA, LA-950V2) ข้อมูลของการกระจายตัวขนาดอนุภาคจะเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดขนาดอนุภาค 3 ครั้ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังกระบวนการสังเคราะห์ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Scanning Electron Microscope, TESCAN,Model: MIRA) การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของสารตั้งต้นและสารประกอบที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็งถูกวิเคราะห์โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วย

เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD, Brand Analytical model EMPYREAN) ด้วยการให้มุม 2θ อยู่ในช่วง 20-40 องศา และใช้ความเร็วสแกนที่ 2.4 องศา 2θ ต่อนาที ด้วยแหล่งกำเนิด CuK_{α} กระแสไฟ 40 กิโลโวลต์ (kV) และ 40 มิลลิแอมแปร์ (mA)

ผลการทดลอง

ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและโครงสร้างผลึกของสารตั้งต้น

ผลการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ยและขนาดอนุภาคสะสม 10-90% ของสารตั้งต้นแสดงใน Table 1 DCPD มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.74 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า $CaCO_3$ และ CaO ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 21.70 และ 22.19 ไมครอน ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาคสะสม 10-90% ของ $CaCO_3$ และ CaO ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัย สารตั้งต้นทั้งสามชนิดมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ โดยที่

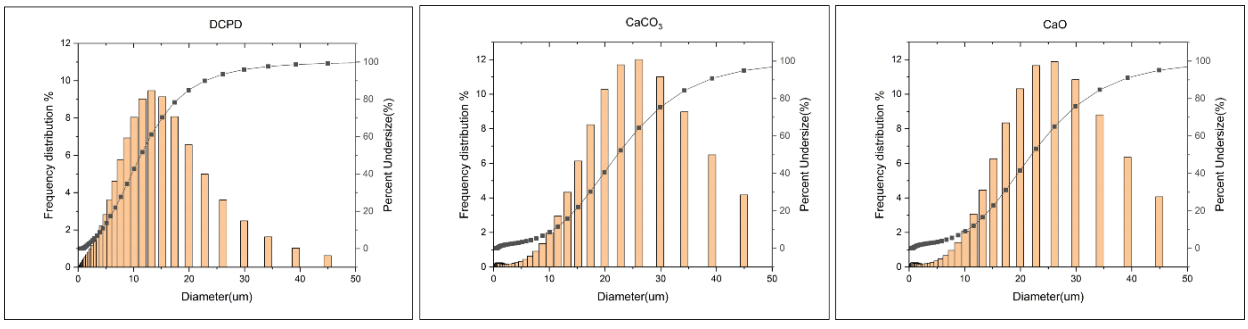


Figure 1 Particle size distribution of the reactants

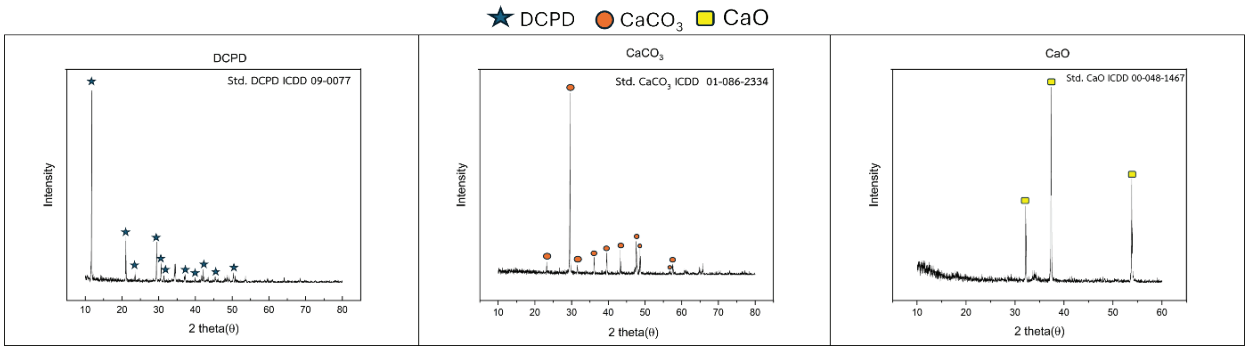


Figure 2 X-ray Diffraction patterns of the reactants

Table 1 Particle size distribution ranges from 10-90%, and average particle size of the reactants.

Reactant	Particle size distribution ranges from 10-90%.	Average particle size (micron)
DCPD	4.47-22.79	10.74
$CaCO_3$	11.57-39.23	21.70
CaO	10.09-39.25	22.19

DCPD มีขนาดอนุภาคโดยรวมที่เล็กกว่า $CaCO_3$ และ CaO ดังแสดงใน Figure 1 ผลการทดสอบโครงสร้างผลึกจากผลการทดลองการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารตั้งต้นก่อนนำไปเข้ากระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็งได้ผลแสดงใน Figure 2

สารตั้งต้น DCPD $CaCO_3$ และ CaO ได้ผลการทดสอบโครงสร้างผลึกที่ปรากฏการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ตรงตามมาตรฐานเลข ICDD 09-0077 ICDD 01-086-2334 และ ICDD 00-048-1467 ตามลำดับ

ผลการทดสอบโครงสร้างผลึกของ TTCP หลังการสังเคราะห์

ลักษณะทางกายภาพหลังการสังเคราะห์แสดงใน Figure 3 พบว่า สารสังเคราะห์ทั้งสองมีสีขาวอมฟ้าและมีความละเอียดที่คล้ายคลึงกัน จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงใน Figure 4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของสารที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 มีรูปร่างไม่แน่นอน (irregular shape) โดยภาพรวมมีขนาดเล็กกว่า 20 ไมครอน มีพื้นผิวเรียบและไม่แสดงถึงความแตกต่างกันระหว่างสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งสอง

Figure 5 แสดงผลการทดสอบโครงสร้างผลึกจากการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลการทดลองจากการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้นทั้ง 2 รูปแบบ จากการเปรียบเทียบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้กับมาตรฐานเลข ICDD 70-1379 ของ TTCP ผลปรากฏว่า การสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้น DCPD กับ $CaCO_3$ ได้ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตรงกับมาตรฐานเลข ICDD 70-1379 ของ TTCP ซึ่งปรากฏให้เห็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่เป็นตำแหน่งหลักที่ 2θ เท่ากับ 29.9° 29.4° 25.3° และ 31.4° ตามลำดับนอกจากนั้นยังมีการปรากฏให้เห็นถึงตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามมาตรฐานเลข ICDD 9-43 ของ HAp ที่เป็นผลึกรองอยู่ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.9° และ 32.1° 32.9° และ 26.0° ตามลำดับอย่างไรก็ตามผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารตั้งต้นที่สังเคราะห์ด้วย DCPD กับ CaO นั้น ปรากฏการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยตามมาตรฐานเลข ICDD 9-0348 ของ α-TCP (α-tricalcium phosphate) ที่เป็นตำแหน่งหลักที่ 2θ เท่ากับ 30.8° 22.9° 24.2° 34.3° และ 34.7° ตามลำดับเป็นโครงสร้างผลึกหลัก นอกจากนี้ยังปรากฏตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ TTCP และ HAp เป็นผลึกรองเช่นเดียวกัน

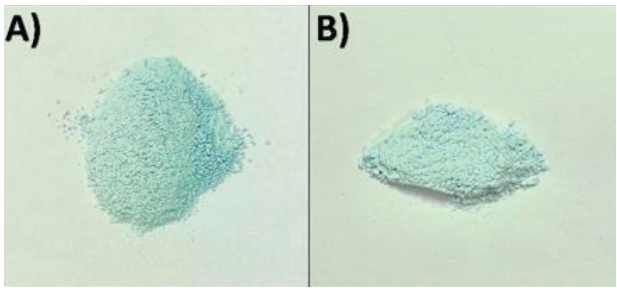


Figure 3 The Synthesized compounds from different reactants A) DCPD+$CaCO_3$ B) DCPD+CaO

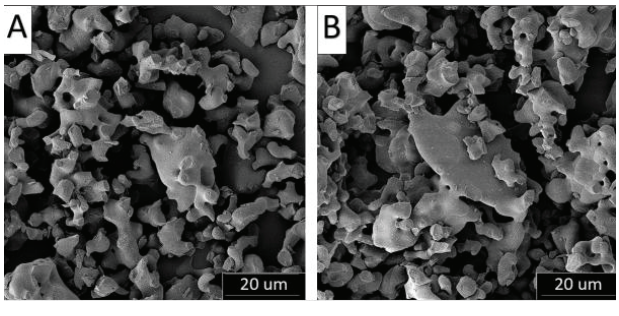


Figure 4 Microstructure of the synthesized compounds: A) DCPD+$CaCO_3$ B) DCPD+CaO

อภิปรายผล

จากผลการสังเคราะห์ TTCP จากสารประกอบตั้งต้น DCPD+$CaCO_3$ และ DCPD+CaO ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งพบว่าผลลัพธ์จากการสังเคราะห์นั้นแตกต่างกัน โดยการสังเคราะห์จากสารตั้งต้นDCPD+$CaCO_3$ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบ TTCP โดยมีเฟสของสารประกอบ HApปะปนมาด้วย Guo และคณะ (Guo *et al*., 2005) ได้รายงานไว้ว่า สารประกอบ เช่น HAp มักปรากฏปะปนร่วมกับ TTCP ในระหว่างขั้นตอนการทำความเย็นลงหลังจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ในขณะที่การสังเคราะห์

จากสารตั้งต้น DCPD+CaO ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไป โดยสารประกอบผลลัพธ์ที่ได้มีโครงสร้างผลึกหลักเป็น α-TCP โดยมีเฟสของ HAp และ TTCP ปะปนมาด้วย กระบวนการการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารตั้งต้นระหว่าง DCPD และ $CaCO_3$ โดยปฏิกิริยาสถานะของแข็งถูกอธิบายไว้ในวรรณกรรมของ Guo *et al*., (2005) และ Samuskevich *et al*., (2003) ระหว่างการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนเฟสประกอบด้วยสามขั้นตอน ในระยะแรก (<400 องศาเซลเซียส) $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ (DCPD) จะสูญเสียน้ำไปเป็น $CaHPO_4$ ตามสมการที่ (3) และเปลี่ยนเป็น $Ca_2P_2O_7$ (Calcium pyrophosphate) ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ (4) ในระยะที่สอง (400 -1200องศาเซลเซียส) $Ca_2P_2O_7$ จะเปลี่ยนเป็น β-$Ca_2P_2O_7$ เริ่มต้นที่ 700 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ (5) โดยที่ $CaCO_3$ เริ่มสลายตัวเปลี่ยนเป็น CaO ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ (6) และ เกิดปฏิกิริยาระหว่าง β-$Ca_2P_2O_7$ กับ CaO เกิดเฟสสารประกอบ β- $Ca_3(PO_4)_2$ (Tricalcium phosphate) ที่ 850 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ (7) หลังจากนั้น β-$Ca_3(PO_4)_2$ ทำปฏิกิริยากับ CaO ที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็น HAp ตามสมการที่ (8) และยังคงพบ CaO ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่

$$CaHPO_4 \cdot 2H_2O \xrightarrow{300\text{-}400C^\circ} CaHPO_4 + 2H_2O \quad (3)$$

$$2CaHPO_4 \xrightarrow{700C^\circ} Ca_2P_2O_7 + H_2O \quad (4)$$

$$Ca_2P_2O_7 \xrightarrow{700C^\circ} \beta\text{-}Ca_2P_2O_7 \quad (5)$$

$$CaCO_3 \xrightarrow{800C^\circ} CaO + CO_2 \quad (6)$$

$$\beta\text{-}Ca_2P_2O_7 + CaO \xrightarrow{850C^\circ} \beta\text{-}Ca_3(PO_4)_2 \quad (7)$$

$$\beta\text{-}Ca_3(PO_4)_2 + CaO + H_2O \xrightarrow{950C^\circ} Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \quad (8)$$

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 2CaO \xrightarrow{1,300\text{-}1,500C^\circ} 3Ca_4(PO_4)_2O + H_2O \quad (9)$$

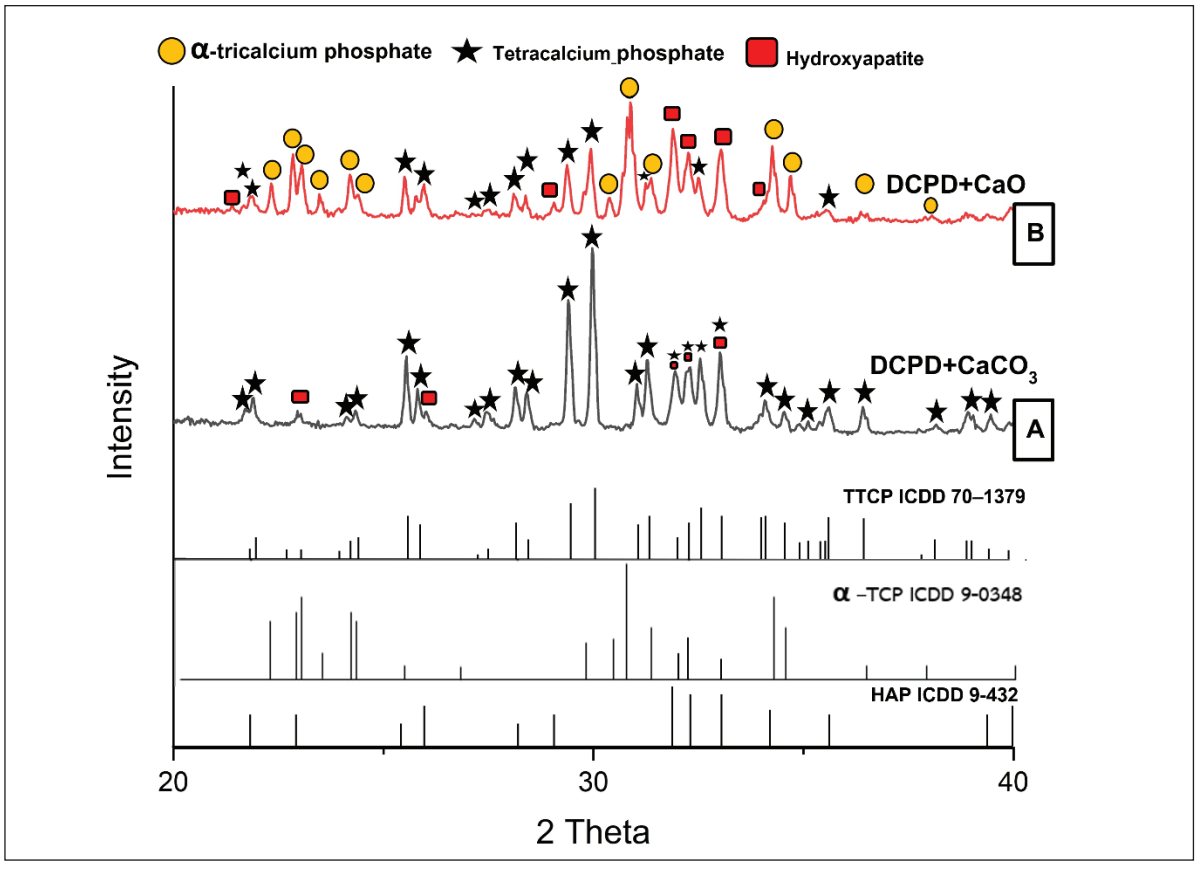


Figure 5 X-ray diffraction patterns of the synthesized compounds A) DCPD+$CaCO_3$ B) DCPD+CaO

สำหรับขั้นตอนสุดท้าย (1,200 -1,500 องศาเซลเซียส) HAp และ CaO จะทำปฏิกิริยาร่วมกันโดย HAp จะสูญเสียน้ำแล้วเปลี่ยนเป็น $Ca_3(PO_4)_2$(Tricalcium phosphate) ซึ่งอยู่ร่วมกับ CaO และเกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน ในที่สุดการเปลี่ยนแปลงนี้จะนำไปสู่การก่อตัวของ $Ca_4(PO_4)_2O$ (TTCP) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (9)

จากวรรณกรรมที่ศึกษาการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบตั้งต้น DCPD+$CaCO_3$ ข้างต้นสามารถสังเกตได้ว่ากระบวนการและอุณหภูมิในการสลายตัวของสารประกอบ $CaCO_3$ เป็นกระบวนการที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบไปเป็น TTCP มีวรรณกรรมหลายวรรณกรรมที่ยืนยันกระบวนการการสลายตัวของสารประกอบ $CaCO_3$ ไปเป็น CaO ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ได้รับความร้อน (Habte *et al*., 2019 ; Samuskevich *et al*., 2003) ดังนั้น การผสมสารประกอบตั้งต้น CaO ร่วมกับ DCPD ตั้งแต่เริ่มต้นอาจส่งผลทำให้กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป อีกหนึ่งกระบวนการที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบไปเป็น TTCP คือ การสูญเสียน้ำของสารประกอบ HAp ไปเป็น $Ca_3(PO_4)_2$ และทำปฏิกิริยากับ CaO ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HAp มีความเสถียรน้อยในช่วงสุดท้ายของปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากวรรณกรรมพบว่ามีการนำสารประกอบ $CaCO_3$ และ CaO มาเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์สารประกอบ HAp (Laonapakul *et al*., 2021 ; Yeong *et al*., 2001 ; Serraj *et al*., 2001) โดยมีรายละเอียดในกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาและคุณสมบัติของ HAp ที่แตกต่างกันเล็กน้อย คือ จากรายงานของ Laonapakul และคณะ (Laonapakul *et al*., 2021) Yeong และคณะ (Yeong *et al*., 2001) และ Serraj และคณะ (Serraj *et al*., 2001) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารประกอบ DCPD ร่วมกับ $CaCO_3$ และ DCPD ร่วมกับ CaO ในการสังเคราะห์ HAp โดยวิธีเคมีเชิงกลร่วมกับปฏิกิริยาสถานะของแข็งพบว่า การใช้สารประกอบ CaO ในการสังเคราะห์ HAp นั้นเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น HAp ได้เร็วกว่าการให้ $CaCO_3$ เป็นสารตั้งต้น และยังรายงานอีกว่าการใช้ CaO แทน $CaCO_3$ ในปริมาณที่เท่ากันเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลง (Kinetic transformation) ของสารตั้งต้น พวกเขาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ $CaCO_3$ ด้วย CaO ที่ปริมาณเท่ากัน ดังนั้นการได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไปในการสังเคราะห์ TTCP จากการใช้ DCPD+CaO เป็นสารตั้งต้นอาจมีเหตุมาจากการเปลี่ยนเฟสไปเป็น HAp ที่เร็วเกินไป นอกจากนี้ HAp ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยสารตั้งต้น DCPD+CaO ยังมีความเสถียรมากกว่า HAp ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยสารตั้งต้น DCPD+$CaCO_3$

Locardi และคณะ (Locardi *et al*., 1993) และ Liao และคณะ (Liao *et al*., 1999) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของ HAp เกรดการค้า (ซึ่งมีความเสถียรที่ดี) ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อ HAp ได้รับความร้อนมากกว่า 1,300 องศาเซลเซียส HAp จะค่อยๆ ปล่อยไออน OH^- และกลายเป็น OHAP ($Ca_{10}(PO_4)_6O$) ในช่วงอุณหภูมิ 1,000-1,360 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัว (Decomposition) ไปเป็น α-TCP และ TTCP ปะปนอยู่กับ HAp ตามสมการที่ (10)

$$Ca_{10}(PO_4)_6O \xrightarrow{1,400\text{-}1,500C^\circ} Ca_4(PO_4)_2O + 2Ca_3(PO_4)_2 \quad (10)$$

ซึ่งตรงกับเฟสของสารประกอบที่ทำการสังเคราะห์ด้วยสารตั้งต้น DCPD+CaO อย่างไรก็ตามสารประกอบ α-TCP ของผลลัพธ์ที่ได้ยังคงเป็นสารประกอบกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชีวภาพในทางการแพทย์

สรุป

จากผลการทดลองในงานวิจัยการสังเคราะห์ TTCP ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน พบว่าสารตั้งต้น DCPD+$CaCO_3$ สามารถสังเคราะห์ได้เป็น TTCP ที่มี HAp ปะปนอยู่ โดยที่สารตั้งต้น DCPD+CaO สามารถสังเคราะห์ได้เป็น α-TCP ที่มี TTCP และ HAp ปะปนอยู่ร่วมด้วย โดยผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างกันจากสมมุติฐานจากสมการเคมี ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบตั้งต้น DCPD+$CaCO_3$ และ DCPD+CaO มากขึ้น ควรมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบตั้งต้นทั้งสองชุดต่อไป นอกจากนี้ยังควรมีการศึกษาการนำสารประกอบผลลัพธ์ที่ได้ไปศึกษาเป็นส่วนประกอบในการทำซีเมนต์กระดูก ซึ่งอาจส่งผลให้ได้คุณสมบัติของซีเมนต์กระดูกที่มีคุณสมบัติเด่นที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารอ้างอิง

Balhaddad, A. A., Kansara, A. A., Hidan, D., Weir, M. D., Xu, H. H., & Melo, M. A. S. (2019). Toward dental caries: Exploring nanoparticle-based platforms and calcium phosphate compounds for dental restorative materials. *Bioactive Materials, 4*, 43-55.

Beck, K., Brunetaud, X., Mertz, J. D., & Al-Mukhtar, M. (2010). On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes. *Geological Society, London, Special Publications, 331*(1), 137-145.

Brown, W. E. (1985). *Dental restorative cement pastes*. United States Patent No. 4518430, 1-14.

Chakraborty, D., Agarwal, V. K., Bhatia, S. K., & Bellare, J. (1994). Steady-state transitions and polymorph transformations in continuous precipitation of calcium carbonate. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 33*(9), 2187-2197.

Chow, L. C., & Takagi, S. (1996). Self-setting calcium phosphate cements and methods for preparing and using them. U.S. Patent No. 5,525,148, June 11, 1996.

Guo, D., Xu, K., & Han, Y. (2005). Influence of cooling modes on purity of solid-state synthesized tetracalcium phosphate. *Materials Science and Engineering: B, 116*(2), 175-181.

Habte, L., Shiferaw, N., Mulatu, D., Thenepalli, T., Chilakala, R., & Ahn, J. W. (2019). Synthesis of nano-calcium oxide from waste eggshell by sol-gel method. *Sustainability, 11*(11), 3196.

Hilgenstock, G. (1883). A new compound of P2O5 and CaO. *Steel Iron, 3*, 498. (In Thai).

Jeon, C., Chun, S., Lim, S., & Kim, S. (2011). Synthesis and characterization of TTCP for calcium phosphate bone cement. *Biomaterials Research, 15*(1), 1-6.

Laonapakul, T., Sutthi, R., Chaikool, P., Talangkun, S., Boonma, A., & Chindaprasirt, P. (2021). Calcium phosphate powders synthesized from CaCO3 and CaO of natural origin using mechanical activation in different media combined with solid-state interaction. *Materials Science and Engineering: C, 118*, 111333.

Liao, C. J., Lin, F. H., Chen, K. S., & Sun, J. S. (1999). Thermal decomposition and reconstitution of hydroxyapatite in air atmosphere. *Biomaterials, 20*(19), 1807-1813.

Locardi, B., Pazzaglia, U. E., Gabbi, C., & Profilo, B. (1993). Thermal behaviour of hydroxyapatite intended for medical applications. *Biomaterials, 14*(6), 437-441.

Matsuya, Y., Matsuya, S., Antonucci, J. M., Takagi, S., Chow, L. C., & Akamine, A. (1999). Effect of powder grinding on hydroxyapatite formation in a polymeric calcium phosphate cement prepared from tetracalcium phosphate and poly (methyl vinyl ether-maleic acid). *Biomaterials, 20*(7), 691-697.

Mosaddegh, E., & Hassankhani, A. (2014). Preparation and characterization of nano-CaO based on eggshell waste: Novel and green catalytic approach to highly efficient synthesis of pyrano [4, 3-b] pyrans. *Chinese Journal of Catalysis, 35*(3), 351-356.

Nagabhushana, K. R., Lokesha, H. S., Reddy, S. S., Prakash, D., Veerabhadraswamy, M., Bhagyalakshmi, H., & Jayaramaiah, J. R. (2017). Thermoluminescence properties of CaO powder obtained from chicken eggshells. *Radiation Physics and Chemistry, 138*, 54-59.

Onimisi, J. A., Ismail, R., Ariffin, K. S., Baharun, N., & Hussin, H. B. (2016). A novel rapid mist spray technique for synthesis of single-phase precipitated calcium carbonate using solid-liquid-gas process. *Korean Journal of Chemical Engineering, 33*, 2756-2760.

Qiu, G., Shi, Z., Xu, H. H., Yang, B., Weir, M. D., Li, G., ... & Zhao, L. (2018). Bone regeneration in minipigs via calcium phosphate cement scaffold delivering autologous bone marrow mesenchymal stem cells and platelet-rich plasma. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 12*(2), e937-e948.

Rodriguez-Verde, I., Regueiro, L., Lema, J. M., & Carballa, M. (2018). Blending based optimisation and pretreatment strategies to enhance anaerobic digestion of poultry manure. *Waste Management, 71*, 521-531.

Rigo, E. C. D. S., Dos Santos, L. A., Vercik, L. C. D. O., Carrodeguas, R. G., & Boschi, A. O. (2007). α-Tricalcium phosphate-and tetracalcium phosphate/dicalcium phosphate-based dual setting cements. *Latin American Applied Research, 37*(4), 267-274.

Samuskevich, V. V., Belous, N. K., & Samuskevich, L. N. (2003). Sequence of solid-state transformations during heat treatment of CaCO3 + CaHPO4 mixtures. *Inorganic Materials, 39*, 520-524.

Sani, S., Muljani, S., Astuti, D., Mardayana, R., & Alfiyani, V. D. (2020, July). Synthesis of Tricalcium Phosphate from Eggshells with Precipitation Method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1569, No. 4, p. 042057). IOP Publishing.

Sargin, Y., Kizilyalli, M., Telli, C., & Güler, H. (1997). A new method for the solid-state synthesis of tetracalcium phosphate, a dental cement: X-ray powder diffraction and IR studies. *Journal of the European Ceramic Society, 17*(7), 963-970.

Shavandi, A., Bekhit, A. E. D. A., Ali, A., Sun, Z., & Ratnayake, J. T. (2015). Microwave-assisted synthesis of high purity β-tricalcium phosphate crystalline powder from the waste of green mussel shells (Perna canaliculus). *Powder Technology, 273*, 33-39.

Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., & Faungnawakij, K. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource Technology, 101*(10), 3765-3767.

Yadav, V. K., Yadav, K. K., Cabral-Pinto, M. M., Choudhary, N., Gnanamoorthy, G., Tirth, V., & Khan, N. A. (2021). The processing of calcium-rich agricultural and industrial waste for recovery of calcium carbonate and calcium oxide and their application for environmental cleanup: A review. *Applied Sciences, 11*(9), 4212.

Yeong, B., Junmin, X., & Wang, J. (2001). Mechanochemical synthesis of hydroxyapatite from calcium oxide and brushite. *Journal of the American Ceramic Society, 84*(2), 465-467.

การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ (กากโหระพา) ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม
Production of charcoal briquettes from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue in the flavors industry

น้ำอ้อย ปัญญา[1] และ นฎาภัสส์ คุ้มกลาง[1*]
Namooy Panya[1] and Nadaphast Koomklang[1*]

Received: 11 January 2024 ; **Revised**: 17 April 2024 ; **Accepted**: 9 May 2024

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กากโหระพา) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเครื่องหอมในระดับอุตสาหกรรมของโรงงานเครื่องหอม ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาผลิตเป็นถ่านอัดแท่ง โดยนำเศษวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที นำไปขึ้นรูปเป็นถ่านอัดแท่งโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน อัตราส่วนของถ่านอัดแท่งที่ทำการศึกษา มีทั้งหมด 5 อัตราส่วน คือ 13:1:20, 13:1:10, 10:1:10, 10:0.5:10 และ 10:0.5:20 โดยน้ำหนัก (ผงถ่านจากเศษวัสดุเหลือใช้: แป้งมันสำปะหลัง: น้ำ) ทดสอบ 3 ซ้ำ พบว่าที่อัตราส่วน 13:1:20 มีค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด และจากการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งโดยใช้การต้มน้ำ มีระยะเวลาเริ่มติดไฟ และระยะเวลาน้ำเดือดสั้นที่สุด ควันน้อย ถ่านไม่แตกประทุ โดยมีค่าพลังงานความร้อน 5257.5 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม ค่าความชื้นร้อยละ 4.85 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 22.44 สารระเหยร้อยละ 71.25 และเถ้าร้อยละ 6.31 ซึ่งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งชุมชน มผช. 238/2547 สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน เพิ่มรายได้ และลดปัญหาการจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อส่งเสริมความยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่ง, เชื้อเพลิงชีวมวลแข็ง, วัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม, กากโหระพา

Abstract
This study aimed to produce charcoal briquettes from the waste materials Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue in the flavors and fragrances industry in Phra Nakorn Si Ayutthaya province. Materials were introduced into the carbonization process at 500 °C and a heating rate of 10 °C/min. Charcoal briquettes were formed by screw compression mixing with cassava starch in five-percent ratios. The mixing ratios consisting of charcoal powder from the waste materials, cassava starch, and water are 13:1:20, 13:1:10, 10:1:10, 10:0.5:10, and 10:0.5:20. Following three tests, the ratio of 13:1:20 was determined to have the highest impact resistance. Besides, the performance tests of charcoal briquettes using boiling water showed the shortest ignition and boiling water times, minimal ash, non-smoke, and non-explosion. The heating value was 5257.50 kcal/kg, 4.85% moisture content, 22.44% fixed carbon, 71.25 volatile matters, and 6.31% bottom ash, satisfying the Thai Community Standard Product (238/2547). Therefore, charcoal briquettes from Thai basil extraction residue in the flavor and fragrance industries can be used as renewable energy, increase income, and reduce the problem of agricultural waste management to promote sustainability and minimize environmental impact.

Keywords: Charcoal briquette, Solid biomass fuel, Waste materials in the flavors and fragrances industry, Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

---

[1] อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000
[1] Faculty of Science and Technology, Raja Mangala University of Technology Suvarnabhumi, Phra Nakhon Si Ayutthaya District, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand.
* Corresponding author. E-mail: Nadaphast.k@rmutsb.ac.th

บทนำ

เนื่องจากในกระบวนการผลิตเครื่องหอม เช่น น้ำมันหอมระเหย และสารสกัดจากธรรมชาติต่าง ๆ ในระดับอุตสาหกรรม จะมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเศษพืชสมุนไพร เช่น ข่า ตะไคร้ ใบมะกรูด ขมิ้น กะเพรา โหระพา ฯลฯ หลังการสกัดรวมเป็นจำนวนหลายตันต่อสัปดาห์ ซึ่งในการกำจัดเศษวัสดุเหลือใช้จะถูกทิ้งร่วมกับน้ำที่ใช้ในการสกัดลงในบ่อพัก จากนั้นจะแยกส่วนที่เป็นของเหลว และกากพืชออกจากกัน โดยในส่วนของกากพืชหลังสกัด ผู้ประกอบการมักนำไปกองทิ้งไว้ในพื้นที่ส่วนบุคคลที่ห่างไกลจากชุมชน โดยไม่สามารถเผาทิ้งได้เนื่องจากจะก่อให้เกิดปัญหาฝุ่นควัน และสร้างความเสียหายต่อสภาพแวดล้อม จึงต้องปล่อยไว้จนย่อยสลายไปเองโดยไร้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรตามธรรมชาติใช้ระยะเวลานาน และในระหว่างการย่อยสลายตามธรรมชาติจะมีปัญหาหลายอย่าง เช่น การเกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องจากการหมักตามธรรมชาติเมื่อกองทิ้งไว้นาน ๆ ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีกลิ่นเหม็น และเป็นการทำลายทัศนียภาพ (กานต์ วิรุณพันธ์ และคณะ, 2560) ด้วยสาเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำกากพืชหลังการสกัด ซึ่งเดิมเป็นปัญหาที่ต้องกำจัด และถูกทิ้งอย่างไร้ประโยชน์ มาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งทดแทนการใช้ไม้จากธรรมชาติ เพื่อช่วยอนุรักษ์ธรรมชาติ และเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกสำหรับการหุงต้มในครัวเรือน ธุรกิจร้านอาหาร และธุรกิจใด ๆ ที่ต้องใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ได้ เนื่องจากถ่านอัดแท่งให้ความร้อนสูงสม่ำเสมอ และระยะเวลาในการให้ความร้อนนานกว่าถ่านไม้ปกติ ปริมาณควันและเถ้าน้อย ไม่มีเปลวไฟ ไม่แตกปะทุ ใช้งานง่าย และประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในเป็นวัสดุดูดความชื้นและบำบัดกลิ่นได้อีกด้วย (ทิพย์วรรณ ช่วยทอง และคณะ, 2557; นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล และคณะ, 2558 ; กานต์ วิรุณพันธ์ และคณะ, 2560)

ถ่านอัดแท่งในท้องตลาดส่วนใหญ่ จะทำจากไม้ไผ่ แกลบ และกะลามะพร้าว ซึ่งต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งจากราคาวัตถุดิบ เนื่องจากมีทางเลือกในการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้ เช่น แกลบ ใช้ในการทำดินเพาะ ไม้ไผ่ และกะลามะพร้าว สามารถใช้ทำภาชนะและเครื่องเรือนต่าง ๆ ทำให้ต้นทุนของวัสดุเหล่านี้สูงขึ้น โดยปัจจุบัน (อ้างอิงราคาปี พ.ศ. 2566) ราคากะลามะพร้าวสดอยู่ที่กิโลกรัมละ 5 บาท เมื่อสั่งซื้อมากกว่า 3 ตันขึ้นไป ดังนั้นการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเป็นจำนวนมาก และถูกทิ้งอย่างไร้ประโยชน์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวมวล จึงนับเป็นการเพิ่มมูลค่าจากวัตถุดิบที่ไม่ต้องลงทุน ช่วยแก้ไขปัญหาในการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2561-2580) ยุทธศาสตร์ที่ 2 ด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขันการเกษตร ซึ่งประเด็นหลักที่ 2 คือ การเกษตรสร้างมูลค่า ที่ส่งเสริมให้มีการนำวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและพลังงานที่เกี่ยวเนื่องกับชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ที่ 5 ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัย จึงได้เลือกใช้กากโหระพา ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเครื่องหอมในระดับอุตสาหกรรมของโรงงานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาผลิตเป็นถ่าน จากนั้นถ่านที่ได้มาบดและอัดแท่งร่วมกับตัวประสาน และทดสอบ คุณสมบัติของถ่านอัดแท่งเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดอัตราส่วนผสมวัตถุดิบ สำหรับผลิตถ่านอัดแท่งในอัตราส่วน ผงถ่านจากกากโหระพา: แป้งมันสำปะหลัง: น้ำ ทั้งสิ้น 5 อัตราส่วนได้แก่ 13:1:20, 13:1:10, 10:1:10, 10:0.5:10 และ 10:0.5:20 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะนำไปขึ้นรูปให้เป็นแท่งด้วยวิธีการอัดเย็น และทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งชุมชน มผช. 238/2547 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพากับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

การทดลอง

1. การเตรียมวัตถุดิบ

นำเศษวัตถุดิบสมุนไพรที่เหลือทิ้งจากการสกัดเอาน้ำมันหอมระเหย และสารสำคัญอื่นออกแล้ว จากโรงงานเครื่องหอมไทย-จีน มาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเข้าเครื่องสับย่อยให้มีขนาดสม่ำเสมอ งานวิจัยนี้ใช้กากโหระพาที่เหลือจากการสกัดสารสำคัญของโรงงานเครื่องหอมไทย-จีน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาทำการลดขนาดด้วยเครื่องสับย่อยให้มีขนาดสม่ำเสมอ (Figure 1) หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ที่ใช้หลักการอัดเย็น สกรูอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 2.5 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวป้อน 7.5 เซนติเมตร และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวอัด 6.5 เซนติเมตร (Figure 2) โดยให้มีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 8-12 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้อัดเป็นก้อนได้ง่าย แต่ถ้ามีความชื้นมากเกินกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้เป็นถ่านมากเกินไป (Sen *et al*., 2016; ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ และคณะ, 2559) หลังจากนั้นตัดกากโหระพาที่อัดก้อนแล้วให้มีขนาดประมาณ 10 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ นำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อให้แปรสภาพเป็นถ่าน จากนั้นนำไปบดเป็นผง (Figure 3) และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 mesh จะได้ผงถ่านจากกากโหระพา จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนัก เก็บในถุงซิปล็อค (zip loc) บรรจุในโถสุญญากาศ จนกว่าจะทำการทดลองขั้นต่อไป

2. การผลิตถ่านอัดแท่ง เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา

ทำการผลิตถ่านอัดแท่งด้วยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 5 อัตราส่วน อัตราส่วนละ 3 ซ้ำ โดยการแปรผันอัตราส่วนของผงถ่าน : แป้งมันสำปะหลัง : น้ำ โดยน้ำหนัก ดังนี้ อัตราส่วนที่ 1 13:1:20 อัตราส่วนที่ 2 13:1:10 อัตราส่วนที่ 3 10:1:10 อัตราส่วนที่ 4 10:0.5:10 และอัตราส่วนที่ 5 10:0.5:20 โดยน้ำหนัก โดยในการผสม จะเตรียมตัวประสานน้ำแป้งมันสำปะหลังก่อน โดยต้มน้ำ ให้ร้อนประมาณ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงใส่แป้งมันสำปะหลังลงไปตามอัตราส่วนที่กำหนด กวนจนข้นเหนียว และมีลักษณะใส จึงใส่ผงถ่านลงไปกวนผสมให้เข้ากัน นำส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นถ่านอัดแท่งแบบไม่ใช้ความร้อน ขนาดถ่านอัดแท่งที่ได้ จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร และมีรูกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรตรงกลาง ตัดถ่านอัดแท่งให้มีความยาวประมาณ 10.00 เซนติเมตร จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที บันทึกน้ำหนักผลผลิตที่ได้ เพื่อหาค่าผลผลิตร้อยละ โดยในการศึกษาวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation-SD) ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ($p<0.05$) และหาทรีตเม้นท์ที่ดีที่สุด (pick the winner) ด้วยวิธีการของดันเน็ตต์ (Dunnett's test)

Figure 1 Thai basil extraction residue

Figure 2 Compressing the residue before drying

Figure 3 Charcoal powder before mixing

Figure 4 Charcoal Briquette from Thai basil extraction residue

3. การหาค่าการต้านทานการกระแทกของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา

การทดสอบถ่านโดยใช้วิธีการตกกระแทก (Richard, 1990) ทำโดยการนำถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา มาทำการตัดให้มีขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้น ต่อการทดสอบแต่ละครั้ง จากนั้น ปล่อยให้ชิ้นถ่านอัดแท่งตกกระแทกพื้นที่เป็นคอนกรีตเรียบ ที่ความสูง 2 เมตร โดยจะทำการปล่อยกระแทกไปจนกระทั่งมีการแตกหัก (แต่ไม่เกิน 50 ครั้ง/ชิ้น) ทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ปล่อยชิ้นถ่านอัดแท่งและจำนวนชิ้นถ่านอัดแท่งที่มีการแตกหัก โดยการแตกหักจะพิจารณาจากขนาดเชื้อเพลิงก่อนการทดสอบ ถ้ามากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดเดิม จะถือว่ามีการแตกหัก จากนั้นหาค่าดัชนีการต้านทานแรงกระแทก (impact resistance index) โดยค่าต้านทานแรงกระแทกต่ำสุดที่ยอมรับได้ต้องมีค่าตั้งแต่ 50 ขึ้นไป

$$IRI = 100 \times \frac{\text{จำนวนครั้งที่ปล่อยชิ้นถ่านอัดแท่ง}}{\text{จำนวนชิ้นถ่านอัดแท่งที่แตกหัก}}$$

4. การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาด้วยการต้มน้ำ

นำถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาแต่ละอัตราส่วน มาศึกษาสมบัติที่พึงประสงค์ในด้านอื่นๆ ของถ่านอัดแท่ง เช่น ไม่มีการแตกประทุเป็นประกาย/สะเก็ดไฟ หรือมีน้อย ลุกไหม้ให้ความร้อนสูงนาน และสม่ำเสมอ ไม่มีควัน หรือมีควันน้อยมาก โดยการนำไปต้มน้ำ (ปฐมศก วิไลพล และคณะ, 2562) โดยบันทึกระยะเวลาในการติดไฟ ระยะเวลาที่น้ำเดือด และระยะเวลาที่ถ่านมอดดับ โดยพิจารณาการเกิดควัน และการแตกประทุของถ่าน จากนั้น คัดเลือกอัตราส่วนที่ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด เพื่อทำการประเมินคุณภาพ และสมบัติทางเชื้อเพลิงต่อไป

5. การทดสอบคุณสมบัติการประเมินคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิง

คุณสมบัติการประเมินคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิง สามารถทดสอบได้โดยใช้องค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงเป็นหลักในการประเมินคุณภาพวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) ดังนี้ ค่าความร้อน (Heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D3286 ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (Volatile matters) ตามมาตรฐาน ASTM D3286 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D3176 ปริมาณเถ้า (Ash content) ตามมาตรฐาน ASTM D3174 และปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามมาตรฐาน ASTM D3173 (ASTM, 1984)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบให้เป็นผงถ่าน

จากตัวอย่างวัตถุดิบ 100 กิโลกรัม เมื่อผลิตที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที และคงอุณหภูมิไว้ 10 นาที จะได้ผงถ่าน 30-35 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 30-35 ของน้ำหนักวัตถุดิบ โดยถ่านกากโหระพาที่บดแล้วจะมีความชื้นร้อยละ 5 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 ซึ่งใกล้เคียงกับงานของวรัญญา เทพสาสน์กุล และคณะ (2559) ที่ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทกะลามะพร้าว โดยนำกะลามะพร้าวมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที และคงอุณหภูมิไว้ 10 นาที จะได้ถ่านกะลามะพร้าวร้อยละ 29-30 ของน้ำหนักวัตถุดิบ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันให้สูงขึ้นจนถึง 600 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกะลามะพร้าวเพียงร้อยละ 28.0 แต่จะมีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น และมีปริมาณสารระเหยลดลง

2. ลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาตามอัตราส่วนต่าง ๆ

เมื่อนำถ่านอัดแท่งในแต่ละอัตราส่วนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 120 นาที พบว่าที่อัตราส่วน ผงถ่านกากโหระพา: แป้งมันสำปะหลัง: น้ำ ที่ 13:1:20 และ13:1:10 จะทำให้ถ่านมีลักษณะทางกายภาพที่ดี ขึ้นรูปได้ ผิวถ่านเรียบ ไม่มีรอยแตก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มผงถ่าน จะทำให้การยึดเกาะของถ่านดีขึ้น แต่ต้องไม่มากไปจนไม่สมดุลต่อแรงยึดเหนี่ยวของตัวประสาน ซึ่งจะเห็นได้จากการลดอัตราส่วนแป้งจาก 1 เป็น 0.5 ที่ผิวถ่านจะมีรอยแตก หากปริมาณน้ำที่ใช้เตรียมน้ำแป้งมันมากเกินไปจะทำให้ถ่านอัดแท่งไม่คงรูป ดังแสดงใน Table 1 นอกจากนี้ความชื้นที่มากขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบนานขึ้น เป็นการสิ้นเปลืองระยะเวลา และพลังงาน

Table 1 Physical characteristics Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	External physical characteristics and adhesion
1	13:1:20	Good adhesion, charcoal surface has no cracks
2	13:1:10	Good adhesion, charcoal surface has no cracks
3	10:1:10	Medium adhesion, charcoal surface has cracks
4	10 0.5: 10	Medium adhesion, charcoal surface has cracks
5	10:0.5:20	Adhesion is quite low, unable to form and the surface of the charcoal after baking has cracks

3. ผลการหาค่าการต้านทานการกระแทกของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงถ่าน จากอัตราส่วน 10:1:10 เป็น 13:1:20 และ 13:1:10 ค่าดัชนีการต้านทานแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (F=163323 และ P=0.00) โดยถ่านอัดแท่งจะมีค่าการต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด เท่ากับ 285 ที่อัตราส่วน 13:1:20 การที่ค่าดัชนีการต้านทานแรงกระแทกที่อัตราส่วน 13:1:10 ต่ำกว่า 13:1:20 น่าจะมาจากปริมาตรน้ำแป้งน้อยกว่า ทำให้การผสมเกิดขึ้นไม่ทั่วถึง และการลดปริมาณแป้ง จะทำให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกลดลง นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากเมื่อน้ำระเหยถ่านอัดแท่งจึงมีค่าการต้านทานแรงกระแทกต่ำลง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Impact resistance testing of Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	IRI			Average of impact resistance index (IRI) ± SD
		1st	2nd	3rd	
1	13:1:20	284.98	285.21	284.89	285.03±0.17
2	13:1:10	250.55	250.20	249.66	250.14±0.45
3	10:1:10	209.53	210.05	210.85	210.14±0.66
4	10:0.5:10	159.95	160.22	160.03	160.07±0.14
5	10:0.5:20	48.82	48.26	48.35	48.48±0.30

4. ผลการทดสอบการให้ความร้อนด้วยการต้มน้ำ

จากทดสอบความร้อนด้วยการต้มน้ำ โดยใช้ถ่านอัดแท่งแต่ละอัตราส่วน น้ำหนัก 200 กรัม ต้มน้ำ 100 มิลลิลิตร จับเวลาติดไฟ ระยะเวลาที่ทำให้น้ำจากอุณหภูมิห้องเข้าสู่จุดเดือด และระยะเวลามอดดับสูงสุด พบว่าแต่ละอัตราส่วน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านอัดแท่ง ที่ขึ้นรูปในอัตราส่วน 13:1:20 โดยน้ำหนัก มีระยะเวลาติดไฟที่ 6.09±0.04 นาที (F=868.40 และ P=0.00) สามารถทำให้น้ำเดือดได้เร็วที่สุด 20.40±.0.07 นาที (F=770254.61 และ P=0.00) และมีระยะเวลามอดดับนาน 40 นาที (F=21883.71 และ P=0.00) ดังแสดงใน Table 3-5

Table 3 The ignition time testing of Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	1st (min)	2nd (min)	3rd (min)	Average of ignition time ± SD (min)
1	13:1:20	6.10	6.05	6.12	6.09±0.04
2	13:1:10	6.08	6.13	6.03	6.08±0.05
3	10:1:10	5.12	5.23	5.18	5.18±0.06
4	10:0.5:10	7.02	7.13	7.09	7.08±0.06
5	10:0.5:20	5.03	5.06	5.11	5.07±0.04

Table 4 Water-boiling testing of Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	1st (min)	2nd (min)	3rd (min)	water-boiling time ± SD (min)
1	13:1:20	20.38	20.35	20.48	20.40±.0.07
2	13:1:10	30.35	30.42	30.38	30.38±0.04
3	10:1:10	35.20	35.15	35.12	35.16±0.04
4	10:0.5:10	38.15	38.20	38.22	38.19±0.04
5	10:0.5:20	37.22	37.28	37.18	37.23±0.05

Table 5 Overall usage times testing of Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	1st (min)	1st (min)	1st (min)	Average of overall usage times ± SD (min)
1	13:1:20	70.05	70.10	70.03	70.06±0.04
2	13:1:10	75.03	75.00	75.09	75.04±0.05
3	10:1:10	78.10	78.02	78.01	78.04±0.05
4	10:0.5:10	75.10	75.05	75.03	75.06±0.04
5	10:0.5:20	70.02	70.00	70.07	70.03±0.04

จากการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านด้วยการต้มน้ำและบันทึกลักษณะการติดไฟของถ่านกากโหระพาอัดแท่งที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถแสดงผลได้ดัง Table 6 ซึ่งจะพบว่าที่อัตราส่วน 13:1:20 ให้ผลการทดสอบดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีการต้านทานแรงกระแทก (IRI) เท่ากับ 285.03±0.17 มีระยะเวลาในการติดไฟ 6.09±0.04นาที และ ระยะเวลาน้ำเดือดเร็วที่สุดที่ 20.40±.0.07 นาที และเวลามอดดับ 70.06±0.04 นาที และที่อัตราส่วน 13:1:10 ให้ผลการทดสอบที่ดีรองลงมา โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีการต้านทานแรงกระแทก (IRI) เท่ากับ 250.14±0.45 มีระยะเวลาในการติดไฟ 6.08±0.05 นาที และ ระยะเวลาน้ำเดือด 30.38±0.04 นาที และเวลามอดดับ 75.04±0.05 นาที ทางผู้วิจัย จึงได้เลือกอัตราส่วน 13:1:20 สำหรับทำการศึกษาต่อไป เนื่องจากมีค่าต้านทานแรงกระแทกที่สูงกว่าและสามารถจุดติดไฟได้เร็วกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ไม่มีการแตกประทุ และไม่มีควัน ดังแสดงใน Table 6

Table 6 Combustion characteristics testing of Charcoal briquette from Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) extraction residue

No.	Blended samples ratio Charcoal powder: cassava starch: water	ignition time (min)	water-boiling time (min)	Overall usage times (min)	Charcoal sparks	Amount of Smoke
1	13:1:20	6.09±0.04	20.40±.0.07	70.06±0.04	No sparks	No
2	13:1:10	6.08±0.05	30.38±0.04	75.04±0.05	No sparks	No
3	10:1:10	5.18±0.06	35.16±0.04	78.04±0.05	sparks	moderate
4	10 0.5: 10	7.08±0.06	38.19±0.04	75.06±0.04	sparks	less
5	10:0.5:20	5.07±0.04	37.23±0.05	70.03±0.04	sparks	less

5. ผลการทดสอบคุณสมบัติการประเมินคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิง

จากการทดสอบ คุณสมบัติการประเมินคุณภาพและสมบัติทางเชื้อเพลิง ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยแสดงค่าความร้อน (Heating value) ปริมาณสารระเหย (Volatile matters) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ปริมาณเถ้า(Ash content) และปริมาณความชื้น (Moisture content) พบว่าถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา ที่อัตราส่วน 13:1:20 มีค่าพลังงานความร้อน 5257.5 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม ค่าความชื้นร้อยละ 4.85 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 22.44 สารระเหยร้อยละ 71.25 และเถ้าร้อยละ 6.31 ซึ่งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งชุมชน มผช. 238/2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) และถือว่ามีค่าพลังงานความร้อนที่สูง เมื่อเทียบกับถ่านอัดแท่งประเภทอื่นๆ เนื่องจากถ่านอัดแท่งกากโหระพามีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ดี และมีปริมาณสารระเหยที่เหมาะสม โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 65-85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (71.25 %) ทำให้มีค่าพลังงานความร้อนสูง โดยมีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านอัดแท่งหลายชนิด เช่น ถ่านอัดแท่งตะกอนเปียกผสมกะลามะพร้าว ซึ่งมีค่าพลังงานความร้อนที่ 4,665 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม (เอกลักษณ์ กิติภัทร์ถาวร และคณะ, 2556) ถ่านอัดแท่งไม้ลำไย 5,061.14 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม (วรัญญา เทพสาสน์กุล และคณะ, 2559) ถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าว 4,910.82 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม ถ่านอัดแท่งใบไม้แห้ง 3,195.75 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม ถ่านอัดแท่งขี้เลื่อย 5,067.55 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม (โรสลีนา อนันตนุกูลวงศ์ และคณะ, 2562) ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมชานอ้อยและใบเตย 5175.6 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม (ศิริวรรณ เทพา และ ศตพล มุ่งค้ำกลาง, 2561) และถ่านอัดแท่งจากเปลือกเมล็ดยางพารา 5,125 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม (ธนกร หอมจำปา และคณะ 2559) (ดังแสดงใน Table 7)

Table 7 Comparative property result of various types of charcoal briquette fuel.

types of charcoal briquette fuel	Heating value (kcal/kg)	Percentage of various property values				Reference
		moisture	carbon	volatile	ash	
Thai Community Standard Product (238/2547)	5,000	8	-	-	-	standards communities (238/2547)
Wet sediment mixed with coconut shells	4,665	4.7	39.9	32.4	23	Kitipattaworn, A. *et al*. (2556)
longan wood	5,061.14	3.92	-	-	-	Tepsaskul, W. *et al.* (2559)
coconut shells	4,910.82	0.04	-	-	-	Anantanukulwong, R. *et al.* (2562)
dry leaves	3,195.75	0.04	-	-	-	
Sawdust	5,067.55	0.04	-	-	-	
coconut shells mixed sugarcane bagasses and pandanus leaves	5175.6	0.10	86.30	2.40	11.06	Thepha, S. & Moongkramglang, S. (2561)
Coconut stalk with solution of tapioca starch	4,141	7.3	10.70	76.80	5.30	Tantisattayakul, T. *et al.* (2558)
Rubber seed husks mixed with wet paste glue (90: 10)	5,125	6.0	-	-	-	Homchampa, T. *et al.* (2559)
Thai Basil extraction residue) in the Flavors and Fragrances Industry	5257.5	4.85	22.44	71.25	6.31	This research

6. การคำนวณต้นทุนการผลิตของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา

จากกากโหระพาหลังสกัด 100 กิโลกรัม จะได้ผงถ่านประมาณ 30-35 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 30-35 ของน้ำหนักวัตถุดิบ เมื่อนำผงถ่านที่ได้มาผสมกับตัวประสาน ในอัตราส่วน ผงถ่าน: แป้งมันสำปะหลัง : น้ำ ที่ 13: 10: 20 โดยน้ำหนัก จะได้ถ่านอัดแท่ง 53- 62 กิโลกรัม โดยมีต้นทุนแปรผันในการผลิตที่ 10 บาท/กิโลกรัม

1. ต้นทุนวัตถุดิบ (วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม) (ต้องเสียค่าแรงและเชื้อเพลิงในการขนไปทิ้ง)

2. ค่าแรง = 300 บาท/วัน

3. ค่าใช้จ่ายในการผลิต

3.1 ค่าเชื้อเพลิง = 40 บาท/รอบการผลิต

3.2 ค่าวัสดุประสาน = 660 บาท/รอบการผลิต

รวม 1,000 บาท/รอบการผลิต

ต้นทุนการผลิตถ่านเท่ากับค่าวัตถุดิบบวกค่าแรงบวกค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อ 100 กิโลกรัม/รอบการผลิตต่อวันเท่ากับ 10 บาท/กิโลกรัม ซึ่งการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านอัดแท่งจากกากโหระพา (C)

$$C = F + VN$$

เมื่อ

F คือ ต้นทุนคงที่ (เตาเผาถ่าน เครื่องบด เครื่องผสมและเครื่องอัดขึ้นรูป = 40,000 บาท)

V คือ ต้นทุนแปรผัน (ค่าแรง ค่าไฟฟ้า ค่าวัสดุ)

N คือ ปริมาณถ่านอัดแท่งที่ต้องผลิต

รายได้จากการขายถ่านอัดแท่ง (R) คำนวณจาก

$$R = IN$$

เมื่อ

I คือ ราคาขายต่อกิโลกรัม (30 บาท)

N คือ จำนวนถ่านเป็นกิโลกรัมที่ผลิตขาย

จุดคุ้มทุนของการผลิตถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาจะเกิดขึ้นเมื่อค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาเท่ากับรายได้จากการขายถ่านอัดแท่ง คำนวณได้เท่ากับ 2,000 กิโลกรัม หากเตาเผาถ่านมีขนาดใหญ่ขึ้น มีเครื่องอัด และขึ้นรูปถ่านที่มีประสิทธิภาพ และรวดเร็วมากขึ้น ก็จะมีต้นทุนในส่วนค่าแรงรายวัน/ปริมาณผลผลิตที่ต่ำลง เนื่องจากได้รอบการผลิตที่มากขึ้น

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาในอุตสาหกรรมเครื่องหอม พบว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่ง โดยอัตราส่วน ผงถ่านจากกากโหระพา: แป้งมันสำปะหลัง: น้ำ ที่ 13:1:20 จะได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพดีที่สุด โดยมีระยะเวลาเริ่มติดไฟ และระยะเวลาน้ำเดือดสั้นที่สุด ควันน้อย ถ่านไม่แตกประทุ มีค่าพลังงานความร้อน 5257.50 กิโลแคลลอรี/กิโลกรัม ค่าความชื้นร้อยละ 4.85 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 22.44 สาระเหยร้อยละ 71.25 และเถ้า ร้อยละ 6.31 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำกากโหระพาหลังการสกัดของโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้เป็นพลังงานทดแทน เพิ่มรายได้ และลดปัญหาการจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อส่งเสริมความยั่งยืน สร้างรายได้และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนได้ และสามารถพัฒนาคุณภาพของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาให้สูงขึ้นได้ โดยเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อน จะช่วยทำให้สารระเหยระเหยออกจากถ่านได้มากขึ้น และสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ของโรงงาน ที่มีค่าพลังงานความร้อนสูงกว่า แต่มีปริมาณการทิ้งน้อยกว่า มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกากโหระพาได้ ดังเช่นในการวิจัยของปัณณทัต ลือโสภา และคณะ (2565) ที่ได้ศึกษาการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ และพบว่า ใบมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่มีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง มีปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและส่งผลต่อค่าความร้อนที่สูงของวัสดุ โดยใบมันสำปะหลัง มีค่าความร้อนสูงที่สุด 19.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง 17.49 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และใบอ้อย 16.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว พบว่าเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า (14.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 14.31 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ผลจากการผสมผสานวัสดุหลักแบบ 2 ประเภท พบว่า อัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ ใบอ้อย: ฟางข้าว (80: 20) 16.08 เมกะจูลต่อกิโลกรัม การผสมผสานชีวมวลวัสดุหลักแบบ 3 ประเภท พบว่า ใบอ้อย: ตอซังข้าว: ฟางข้าว (60: 20: 20) ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด 15.68 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเสริมส่งผลทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังส่งผลทำให้ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มลดลง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์หันตรา และ โรงงานอุตสาหกรรมเครื่องหอมไทย-จีน (TCFF) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านบุคลากร เครื่องมือต่างๆ และวัตถุดิบสำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กานต์ วิรุณพันธ์, ธนารักษ์ สายเปลี่ยน, & ภาคภูมิใจชมพู. (2560). การผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลาม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 2(1), 1-15.

ทิพย์วรรณ ช่วยทอง, ธเนศ ไชยชนะ, & ศุภลักษณ์ อำลอย. (2557). สมบัติของถ่านจากเปลือกหมาก. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 17(3), 68-75.

ธนกร หอมจำปา, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, & ประพันธ์พงษ์ สมศิลา. (2559). เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกเมล็ดยางพารา. *การประชุมวิชาการครั้งที่ 8, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์*, 190-196.

ธนาพล ตันติสัตยกุล, สุริฉาย พงษ์เกษม, ปรีย์ปวีณ ภูหญ้า และ ภานุวัฒน์ ไถ้บ้านกวย. (2558). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. *Thai Science and Technology Journal*, *23*(3), 418-431.

นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกูล และ พัชรี ปรีดาสุริยะชัย. (2558). การศึกษากากกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, *7*(13), 15-25.

ปฐมศก วิไลพล, ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์, นพรัตน์ สีหะวงษ์, จิรานุวัฒน์ เม่นเกิด, ปรากรณ์ ประกอบกสิกรณ์ และ ปิยะวัต คำบุญ. (2562). การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของกระบวนการเผาอิฐมอ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, *4*(1), 40-50.

ปัณณทัต ลือโสภา และ วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์. (2565). การผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, *42*(4), 127-137.

โรสลีนา อนันตนุกูลวงศ์, รอดียะห์ เจ๊ะแม และ นุรมายามีน สเร๊ะนุ. (2562). การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. *วารสารวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มร ย.*, *4*(1), 47-53.

ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ, ณรงค์ศักดิ์ ลาปัน, วิภาวดี ชัชวาล และ อานันท์ ธัญญเจริญ. (2559). การพัฒนาก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้ง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, *39*(2), 239-255.

วรัญญา เทพสาสน์กุล, วรัญญา ธรรมชาติ และ อัครินทร์ อินทนิเวศน์. (2559). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชั่นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทกะลามะพร้าว. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12*, 610-618.

ศิริวรรณ เทพา และ ศตพล มุ่งค้ำกลาง. (2561). การศึกษาการผลิตถ่านแท่งจากกะลามะพร้าวผสมชานอ้อยและใบเตย. *การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11*. วันที่ 28-30 พฤศจิกายน 2561.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.) เลขที่ 238/2547. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http: //tcps.tisi.go.th/pub%5Ctcps238_47.pdf.

เอกลักษณ์ กิติภัทร์ถาวร, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ วลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม. (2556). เชื้อเพลิงอัดแท่งจากการผลิตร่วมของตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 10, 43-56.

American Society for Testing and Materials. (1984). *Annual book of ASTM standards, petroleum products, lubricants, and fossil fuels, sect. 5 of v. 05.05: Gaseous fuels, coal, and coke*. Philadelphia.

Richard, S.R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25, 89-100.

Sen, R., Wiwatpanyaporn, S. and Padmakar Annachhatre, A. (2016). Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, *17*(2), 158-175.

การกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก

Reed dye removal using the Fenton oxidation process coupled with an ultrasonic-assisted method

รวินิภา ศรีมูล[1*] และ สมยศ สันติมาลัย[2]
Rawinipa Srimoon[1*] and Somyod Santimalai[2]

Received: 29 March 2024 ; **Revised**: 7 May 2024 ; **Accepted**: 31 May 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมกกในน้ำด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก ผลการทดลองพบว่า ร้อยละของการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 และ Fe^{2+} อนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) จะไปจับกับ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่มีอยู่ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมแต่ปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} ยังคงที่ ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง เพราะอนุมูล $OH^{\bullet}$ ไม่เพียงพอที่จะสลายโมเลกุลของสีย้อมได้ ร้อยละของการบำบัดสีย้อมสูงสุดเท่ากับ 86.69±1.41 เมื่อใช้เวลาบำบัดนาน 30 นาที ความเข้มข้นของ H_2O_2 และ Fe^{2+} เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อลิตร และ 1.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมกกที่ 1.5 กรัมต่อลิตร เมื่อให้คลื่นอัลตราโซนิกช่วยเสริมการเกิดกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันเนื่องจากทำให้โมเลกุลของน้ำสลายตัวได้เป็นอนุมูล $H^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ และ $OH^{\bullet}$ แต่เมื่อเพิ่มความถี่ H_2O_2 สลายตัวเป็นน้ำและออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง อย่างไรก็ตามอนุมูล $OH^{\bullet}$ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอกับการสลายโมเลกุลของสีย้อมที่มีในระบบ แต่เมื่อให้คลื่นอัลตราโซนิก 4 จุด ความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ กำลังไฟ 90 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 12-15 โวลต์ ร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน การกำจัดสีย้อมเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 92.28±0.90 ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 52.51±0.69 และมี Fe^{2+}เหลืออยู่ 0.315±4.23 กรัมต่อลิตร

คำสำคัญ: อัลตราโซนิก, สีย้อมกก, กระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

Abstract

The objective of this research was to study the reed dye removal using Fenton oxidation process coupled with ultrasonic method. The results showed that percentage of dye removal was increased by increasing H_2O_2 and Fe^{2+} concentration. However, the higher amount of H_2O_2 and Fe^{2+} decreased the efficiency of dye removal due to the scavenging of $OH^{\bullet}$ radicals by the excess H_2O_2 and Fe^{2+}. When the initial dye concentration increased and the of H_2O_2 and Fe^{2+} remained constant, the removal efficiency decreased because of the insufficient $OH^{\bullet}$ radical for the degradation of dye molecules. The maximum removal was 86.69±1.41% at 30 minutes and the concentration of H_2O_2 and Fe^{2+} were 10 mL/L and 1.0 g/L, respectively. The presence of ultrasonic during the Fenton oxidation reaction pronounced the efficiency of dye removal, on account of the abundance of $H^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ and $OH^{\bullet}$ radicals from the degradation of water molecules. However, the increasing of ultrasonic frequency raised the system temperature, leading the degradation of H_2O_2 to water and oxygen. The results revealed that the use of four-point ultrasonic transducer with 80 KHz

[1] รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี 22210
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี 22210
[1] Associate professor, Department of Applied Science and Biotechnology, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Chanthaburi, 22210
[2] Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Integrated-Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Chanthaburi, 22210
* Corresponding author. E-mail: rawinipa_sr@rmutto.ac.th

frequency, 90 W power, and 12-15 V electricity voltage decreased the color by 92.28±0.90%. The COD reduction was 52.51±0.69% and the remaining Fe^{2+} was 0.315±4.23 g/L.

Keywords: Ultrasonic, Reed dye, Fenton oxidation process

บทนำ

สีย้อมกก (Reed dyes) ถูกใช้ในการย้อมสีเส้นกกในการทอเสื่อซึ่งเป็นอุตสาหกรรมพื้นบ้านของจังหวัดจันทบุรี สีที่ใช้ในการย้อมกกส่วนใหญ่เป็นสีอะโซ (Azo dye) ซึ่งละลายน้ำได้ดี น้ำทิ้งจากการทอเสื่อกกจะมีสีคล้ำและย่อยสลายได้ยาก เนื่องจากสีย้อมมีโครงสร้างเป็นวงแหวนแอโรมาติกที่ยากต่อการย่อยสลาย (Lade *et al*., 2012) ดัง Figure 1

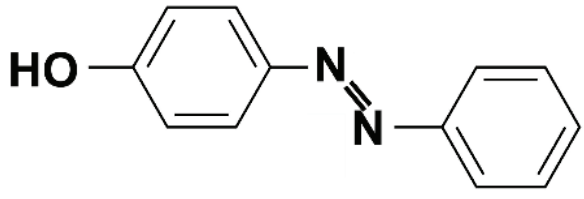


Figure 1 Azo dye structure

น้ำทิ้งจากการฟอกย้อมสามารถบำบัดได้หลายวิธี เช่น การกรอง การตกตะกอน การดูดซับ การย่อยสลายสีย้อมทางชีวภาพ การเกิดออกซิเดชัน หรือใช้หลายวิธีร่วมกัน (Asghar *et al.,* 2019) การบำบัดทางเคมีด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน (Fenton oxidation) สามารถบำบัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และมีเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดอนุมูล ไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ดีมาก สามารถทำลายโครงสร้างของสีย้อมได้ ยิ่งปฏิกิริยาการเกิดอนุมูล $OH^{\bullet}$ นี้เกิดได้ดีเท่าใด การสลายโมเลกุลของสีก็จะเกิดได้ดีขึ้นเท่านั้น ดังสมการ (Neyens & Baeyens, 2003)

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + OH^{\bullet} \quad (1)$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe\text{-}OOH^{2+} + H^+ \quad (2)$$

$$Fe\text{-}OOH^{2+} \rightarrow Fe^{2+} + HOO^{\bullet} \quad (3)$$

$$Fe^{3+} + HOO^{\bullet} \rightarrow Fe^{2+} + O_2 + H^+ \quad (4)$$

เมื่อเกิดอนุมูล $OH^{\bullet}$ แล้วอนุมูล $OH^{\bullet}$ จะไปทำให้สารอินทรีย์สลายตัวได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$\text{Organic compounds} + HO^{\bullet} \rightarrow H_2O + CO_2 \quad (5)$$

ปฏิกิริยาเฟนตันถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารปนเปื้อนที่เป็นพิษหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เช่น สารประกอบแอโรมาติก สีย้อม และฟีนอล ช่วยลดค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand, BOD) ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) กลิ่นและสี (Punzi *et al*., 2015 ; Qin-He *et al*., 2015 ; Slama *et al*., 2024 ; Kavian *et al*., 2024) งานวิจัยของ Tavares *et al.* (2020) ใช้กระบวนการเฟนตันเพื่อกำจัดสีย้อม RR195, RB19 และ RY145 โดยใช้ Fe^{2+}0.5 มิลลิโมลาร์ H_2O_2 50 มิลลิลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 0.075 กรัมต่อลิตร ให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมในสาละลายสีผสมและน้ำทิ้งสีย้อมจริง เท่ากับร้อยละ 56 และ 22 ตามลำดับ

การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันทำได้โดยการเพิ่มปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} แต่จะเกิดปัญหาสารละลายขุ่นเนื่องจากสลัดจ์ของ Fe^{3+} (Fe (III)-iron sludge) ทำให้ต้องกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นอีก (Hsueh *et al.,* 2005) การใช้กระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับวิธีการอื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมให้ดีขึ้นได้โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณสารเคมี งานวิจัยของ Meddah *et al*. (2022) ซึ่งใช้หลายวิธีร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ การใช้กระแสไฟฟ้า รังสีอัลตราไวโอเลต และคลื่นอัลตราโซนิก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Naphthol Blue Black (NBB) ได้ร้อยละ 98, 95 และ 65 ตามลำดับ ภายในเวลา 60 นาที จากที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20-106 กิโลเฮิร์ตซ์ คลื่นอัลตราโซนิกทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กๆ เมื่อความถี่สูงเพียงพอก็จะทำให้โพรงอากาศเหล่านี้ระเบิดออก ประกอบกับภายในโพรงอากาศมีอุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสลายตัวได้เป็นอนุมูล $H^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ และ $OH^{\bullet}$ (Neppolian *et al*., 2004) ดังสมการ

$$)))) H_2O \rightarrow H^{\bullet} + OH^{\bullet} \quad (6)$$

เมื่อ

)))) คือ คลื่นอัลตราโซนิก

ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้กระบวนการเฟนตัน ออกซิเดชันเกิดได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียวอนุมูล $OH^{\bullet}$ ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอกับการสลายโมเลกุลของสีย้อมที่มีอยู่ แต่ถ้านำไปใช้ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน การกำจัดสีย้อมจะสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น Sun *et al*. (2007) พบว่าเมื่อใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงหรือคลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับกระบวนการเฟนตันความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ นาน 30 นาที สามารถกำจัดสีย้อม Acid black 1 ได้สูงถึงร้อยละ 98.83 สูงกว่าการใช้กระบวนการเฟนตันหรือใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียว การวิจัยในครั้งนี้จะใช้กระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกก ซึ่งผลจากการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับติดตั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ต่อไปในอนาคตเพื่อบำบัดสีย้อมในน้ำ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. การเตรียมสารละลายสีย้อมกกในห้องปฏิบัติการ

โดยปกติในการย้อมกกในการทอเสื่อด้วยวิธีพื้นบ้านจะใช้ผงสีประมาณ 2 ช้อนโต๊ะต่อน้ำ 1 ปี๊บ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้สีย้อมกกตราหัวช้าง ของบริษัทศิวะสัมพันธ์ จำกัด (ประเทศไทย) โดยผสมผงสีย้อมกกจำนวน 4 สี คือ แดง เขียว เหลือง และน้ำเงิน ผสมกับน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร ให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการสำหรับแต่ละการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยเป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ได้แก่ เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1,10-ฟีแนนโทรลีน (1,10-phenanthroline) ซื้อจาก Univar Ajax Finechem (New Zealand) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 30 (30% H_2O_2) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) Sodium actetate (CH_3COONa) ซื้อจาก QRëC (New Zealand) เมอร์คิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$) เฟอร์โรอิน (ferroin) แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4 \cdot FeSO_4$) ซื้อจาก KemAus (Australia)

2. การหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมสูงสุด (Maximum wavelength, λ_{max})

หาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีย้อมซึ่งปกติจะเป็นสีผสม นำสารละลายสีย้อมเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร (ผสมสีย้อมกกแต่ละสีหนัก 0.375 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร) วัดความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Libra S22 Biochrom, UK)

3. ศึกษาการกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

กระบวนการเฟนตันออกซิเดชันใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งในการทดลองนี้ได้จาก $FeSO_4$ ให้อนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) เข้าไปออกซิไดส์สารอินทรีย์ ในที่นี้คือสารละลายสีย้อม (Patil & Raut, 2014) โดยผสมสีย้อมกับ H_2O_2 และ Fe^{2+} ความเข้มข้นที่เหมาะสม กวนสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก ทิ้งให้ตกตะกอน จากนั้นกรองตะกอนออกด้วยผ้าขาวบาง นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่เพื่อหาร้อยละของการกำจัดสี (% Removal) จากสูตร

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาสิ้นสุดการทดลอง

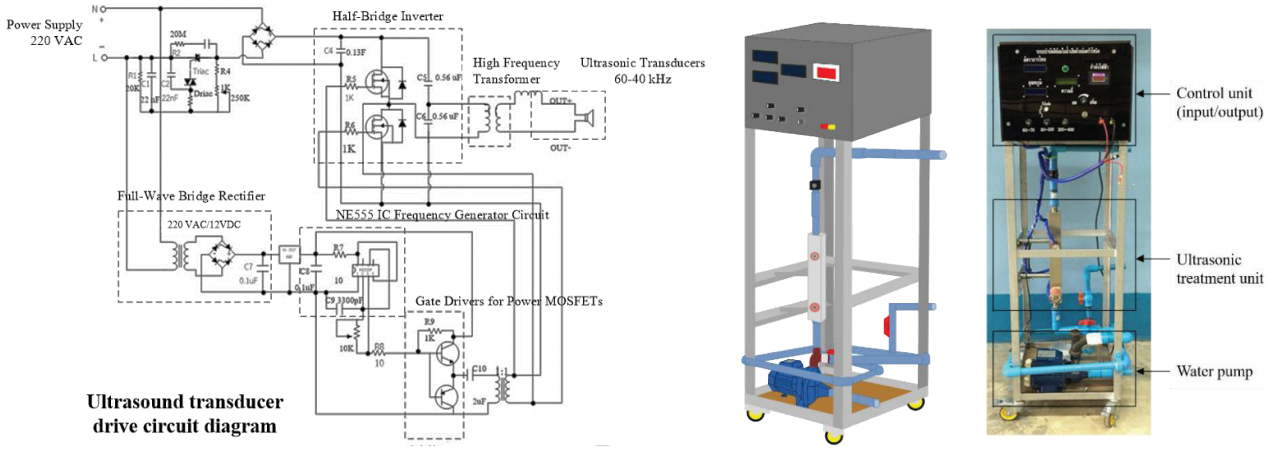
ดังนั้น จึงทำการศึกษาปัจจัย ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปริมาณเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และเวลาที่ใช้บำบัด

3.1 ศึกษาปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+}

ปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาออกแบบการทดลองเป็นแบบ Bottle-point method แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 4x4 มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณ H_2O_2 4 ความเข้มข้น คือ 2.5, 5.0, 10.0 และ 20.0 มิลลิลิตรต่อลิตร และปริมาณ Fe^{2+} 4 ความเข้มข้น คือ 0.10, 0.50, 1.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตร ใช้สีย้อมความเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร กวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที นาน 30 นาที กรองสารละลายแล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร

3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมกก

ในการทดลองผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจะเตรียมสารละลายสีย้อมกกปริมาตร 10 ลิตร ความเข้มข้น 3 ค่า คือ 0.75, 1.5 และ 3.0 กรัมต่อลิตร H_2O_2 เข้มข้น 10.0 มิลลิลิตรต่อลิตร Fe^{2+} เข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร กวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที นาน 30 นาที กรองสารละลายแล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร



(a) (b)

Figure 2 Ultrasonic treatment system circuit diagram and (b) real equipment

3.3 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการกำจัด

หาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ใช้สารละลายสีย้อมเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร H_2O_2 เข้มข้น 10.0 มิลลิลิตรต่อลิตร และ Fe^{2+} เข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร กวนสารละลายด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที นาน 10, 20, 30, 60, 90 และ 120 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดกรองสารละลายแล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร

4. ศึกษาการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

ออกแบบเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกดัง Figure 2 ตัวเครื่องทำจากสแตนเลสติดตั้งหัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกจำนวน 4 จุด ในช่วงความถี่ 60-400 กิโลเฮิร์ตซ์ ใช้วงจรสร้างความถี่ไอซีเบอร์ NE555 (Texas Instruments Incorporated, USA) กำเนิดความถี่แบบอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibator) ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 12-15 โวลต์

4.1 การหาความถี่ที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การทดลองหาความถี่ที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม ใช้คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ตั้งแต่ 60-400 กิโลเฮิร์ตซ์ เพียงอย่างเดียว สารละลายสีย้อมกกเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ปรับความถี่ 60, 70, 80, 100, 200 และ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ พร้อมวัดกำลังที่ได้จริงในระบบ ให้คลื่นนาน 30 นาที กรองสารละลายแล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 512 นาโนเมตร

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ค่าซีโอดี (COD) และปริมาณ Fe^{2+}ที่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมที่ผ่านกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก

ทำการวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมกกที่กำจัดได้ ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) และปริมาณ Fe^{2+} ที่เหลืออยู่ (Remaining Fe^{2+}) ในสารละลายสีย้อมที่ผ่านกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก ใช้สารละลายสีย้อมกก เข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร H_2O_2 เข้มข้น 10.0 มิลลิลิตรต่อลิตร และ Fe^{2+} เข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร ให้คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟ 90 วัตต์ นาน 30 นาที กรองสารละลายแล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณสีที่เหลืออยู่ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร ค่าซีโอดีวิเคราะห์ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open reflux method) โดยทำปฏิกิริยากับ $HgSO_4$ และสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ ในกรด H_2SO_4 แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย Ferrous ammoniumsulfate โดยมี Ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ ส่วนปริมาณ Fe^{2+} ที่เหลืออยู่ ด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตมิตรีโดยทำให้เกิดสารเชิงซ้อน ของ Fe^{2+} กับสารละลาย 1,10-phenanthroline

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลองด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test และ *t*-test กำหนดความเชื่อมั่นที่ระดับ $p<0.05$ (SPSS for Window) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD)

ผลการศึกษา

1. ผลการหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม

การหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด (λ_{max}) ของสารละลายสีผสมของสีย้อมกก 4 สี ความเข้มข้นรวม 1.5 กรัมต่อลิตร ผลเป็นดัง Figure 3 พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลายสีผสมอยู่ที่ความยาวคลื่น 512 นาโนเมตร

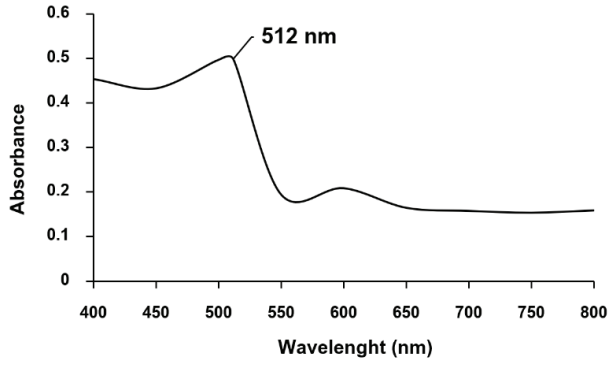


Figure 3 Maximum wavelength of dye solution

2. ผลการหาปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม

ปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม ผลเป็นดัง Table 1

Table 1 Effect of H_2O_2 and Fe^{2+} concentration on dye removal (n=3)

$[Fe^{2+}]$ (g/L)	$[H_2O_2]$ (mL/L)			
	2.5	5.0	10.0	20.0
0.1	36.20±0.08[a]	44.00±0.36[b]	61.10±0.67[c]	46.55±1.17[d]
0.5	39.70±0.10[e]	55.20±0.21[f]	72.70±0.92[g]	55.37±0.43[f]
1.0	49.20±0.20[h]	58.90±0.67[i]	88.20±0.45[j]	65.96±0.81[k]
2.0	50.10±0.08[l]	62.60±0.11[m]	87.50±0.93[j]	65.45±1.21[k]

The different superscript letters ($^{a, b, c,\cdots}$) showed the significant differences (p<0.05)

จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 และ Fe^{2+} ร้อยละของสีที่กำจัดได้เพิ่มขึ้น (p<0.05) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H_2O_2 เป็น 20.0 มิลลิลิตรต่อลิตร การกำจัดสีย้อมลดลงเนื่องจาก H_2O_2 ที่สูงเกินไปจะสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) มากเกินพอ ซึ่งจะไปจับกับ H_2O_2 ที่มีอยู่ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง (Li *et al.*, 2014) ดังสมการที่ (7)

$$OH^{\bullet} + H_2O_2 \rightarrow H_2O + HO_2^{\bullet} \quad (7)$$

หรือไปจับกับ Fe^{2+} ดังสมการที่ (8)

$$OH^{\bullet} + Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + HO^{-} \quad (8)$$

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Suhan *et al.* (2021) ที่ใช้กระบวนการเฟนตันออกซิเดชันบำบัดสี Sudan black-B พบว่า ความเข้มข้น H_2O_2 ที่เหมาะสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ Fe^{2+} อยู่ระหว่าง 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร หากใช้ความเข้มข้นสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลง

จากการวิจัยในครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้ Fe^{2+} 1.0 กรัมต่อลิตร และ H_2O_2 10 มิลลิลิตรต่อลิตร ร้อยละการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับ 88.20±0.45 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น Fe^{2+} เป็น 2.0 กรัมต่อลิตร ร้อยละของการกำจัดสีไม่แตกต่างกัน (p>0.05) จึงเลือก Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร และ H_2O_2 10 มิลลิลิตรต่อลิตร ในการทดลองต่อไป

3. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมกก

ผลของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็นดัง Table 2

Table 2 Effect of initial dye concentration on dye removal (n=3)

Initial dye concentration (g/L)	% Removal
0.75	67.91±0.34[a]
1.50	88.12±0.69[b]
3.00	70.68±0.21[c]

The different superscript letters ($^{a, b, c}$) showed the significant differences (p<0.05)

สีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.50 กรัมต่อลิตร ให้ร้อยละของการกำจัดสีสูงสุด ท่ากับ 88.12±0.69 ซึ่งสูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.75 และ 3.00 กรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 3.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง เพราะอนุมูล $OH^{\bullet}$ ไม่เพียงพอที่จะสลายโมเลกุลของสีย้อมได้ ในขณะที่ปริมาณ H_2O_2 และ Fe^{2+} คงที่ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al*. (2022) ที่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม Reactive yellow 3 มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะลดลง แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วสีย้อมที่ความเข้มข้น

ต่ำๆ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงกว่าที่ความเข้มข้นสูง แต่จากผลการทดลองครั้งนี้พบว่าที่ความเข้มข้น 0.75 กรัมต่อลิตร ร้อยละการกำจัดสีต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 1.50 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาจเนื่องมาจากที่ความเข้มข้น 1.50 กรัมต่อลิตร ยังมีอนุมูล $OH^{\bullet}$ เพียงพอที่จะสลายโมเลกุลของสีย้อมได้ อย่างไรก็ตาม ในการย้อมสีกกตามวิธีพื้นบ้านจะผสมสีให้มีความเข้มข้นประมาณ 1.7 กรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกับความเข้มข้น 1.50 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้จึงต้องพิจารณาจากผลการทดลองร่วมกับความเข้มข้นของสีที่ใช้จริง

4. ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัด

ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมเป็นดัง Table 3 และ Figure 4 ร้อยละของการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และสูงสุดที่เวลา 30 นาที การกำจัดเท่ากับร้อยละ 86.69±1.41 หลังจากนั้นการกำจัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีนัยสำคัญ (p>0.05) เนื่องจากปริมาณ H_2O_2 และ $FeSO_4$ คงที่ จากการศึกษาของ Barbusiński (2005) ก็พบว่า การกำจัดสีย้อม Azo dye acid red 18 ด้วยกระบวนการเฟนตัน ออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดีในช่วง 60 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนครบ 240 นาที

Table 3 Effect of contact time on dye removal (n=3)

Time (min)	% Dye removal
10	44.59±2.49[a]
20	66.86±2.78[b]
30	86.69±1.41[c]
60	87.14±0.80[c]
90	87.60±1.76[c]

The different superscript letters ([a, b, c]) showed the significant differences (p<0.05)

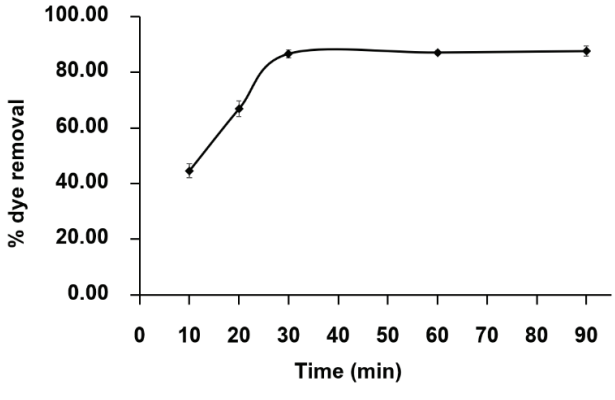


Figure 4 Effect of contact time on dye removal

5. ผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

5.1 ผลการทดลองหาความถี่ที่เหมาะสม

เมื่อให้คลื่นอัลตราโซนิกความถี่สูงเพียงพอในน้ำจะทำให้โมเลกุลของน้ำสลายตัวได้เป็นอนุมูล $H^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ และ $OH^{\bullet}$ เมื่อทดลองให้คลื่นอัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียวทำการกำจัดสีย้อม ผลเป็นดัง Table 4 คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ 90 วัตต์ สามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 14.84±0.52 เมื่อเพิ่มความถี่ร้อยละของการกำจัดลดลง เนื่องจากเกิดความร้อนขึ้นในระบบที่วัดได้จริงสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส (อยู่ระหว่าง 45-47 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ความถี่เกิน 100 เฮิร์ตซ์) ความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้ H_2O_2 สลายตัวได้เป็นน้ำและออกซิเจน ดังสมการ (9) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง (Hashemian, 2013)

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2 \quad (9)$$

Table 4 Effect of ultrasonic frequency on dye removal (n=3)

Frequency (KHz)	Power (W)	% Dye removal
60	68	5.80±1.122[a]
70	100	12.56±1.15[b]
80	90	14.84±0.52[c]
100	108	14.36±1.25[c]
200	80	12.38±1.39[b]
400	72	5.13±1.77[d]

The different superscript letters ([a, b, c,d]) showed the significant differences (p<0.05)

5.2 การกำจัดสีย้อม ค่าซีโอดี และปริมาณ Fe^{2+} ที่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมที่ผ่านกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก

จากมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติสิ่งแวดล้อม, 2559) กำหนดให้ค่าซีโอดีเป็นหนึ่งในมาตรฐานน้ำทิ้ง และเมื่อมีการใช้เฟอรัสซัลเฟตในกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน จึงทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และปริมาณ Fe^{2+} ที่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมที่ผ่านกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก ผลเป็นดัง Table 5 คลื่น อัลตราโซนิกทำให้เกิดอนุมูล $OH^{\bullet}$ ซึ่งสลายโมเลกุลของสีย้อมได้ แต่การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมไม่สูงมากเพราะอนุมูล $OH^{\bullet}$ ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอกับการสลายโมเลกุลของสีย้อมที่มี

อยู่ แต่เมื่อใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน การกำจัดสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 ได้ $Fe\text{-}OOH^{2+}$ และสลายตัวต่อได้ Fe^{2+} และ $HOO^{\bullet}$ ซึ่งจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อมีการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Sun *et al*., 2007) นอกจากนี้ ยังช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นโดยที่ไม่ต้องเพิ่มสารเคมีในระบบ

Table 5 Percentage of dye removal, COD and remaining Fe^{2+} using Fenton oxidation couple with ultrasonic (n=3)

Parameters	Before treatment	After treatment	% Reduction
Dye (g/L)	1.50±0.0	0.116±1.3	92.28±0.90
COD (mg/L)	336.21±0.39	159.67±2.4	52.51±0.69
Remaining Fe^{2+} (g/L)	1.0±0.0	0.315±4.23	-

จากผลการปริมาณ Fe^{2+} ที่เหลืออยู่มีค่า 0.315±4.23 กรัมต่อลิตร เนื่องจากในปฏิกิริยาเฟนตันมีการใช้ Fe^{2+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและจะเปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} และถึงแม้ว่า Fe^{3+} ที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์กลับมาเป็น Fe^{2+} อีกครั้งก็ตาม แต่ปฏิกิริยาอาจเกิดไม่สมบูรณ์ Fe^{3+} บางส่วนจะกลายไปเป็นสลัดจ์ที่กรองออกไปจากระบบ และอาจมาจากการที่ H_2O_2 ที่อยู่ในระบบไม่เพียงพอกับการทำปฏิกิริยากับ Fe^{3+} ทำให้มี Fe^{2+} บางส่วนหายไปจากระบบได้ ผลการทดลองกำจัดสีย้อมกกในครั้งนี้ สามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 92.28±0.90 และลดค่า COD ได้ร้อยละ 52.51±0.69 เมื่อเทียบกับการวิจัย ของ Chaiyaraksa & Pongrak (2017) ซึ่งศึกษาการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิก บำบัดสีได้ร้อยละ 64.01±0.19 ลดค่า COD ได้ร้อยละ 83.19±0.00 เนื่องจากมีการใช้ H_2O_2 เข้มข้นประมาณ 13.8 มิลลิลิตรต่อลิตร และ Fe^{2+} เข้มข้น 16.7 กรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าการวิจัยในครั้งนี้ อย่างไรก็ตาม ค่าซีโอดีที่บำบัดได้ในครั้งนี้ยังเกินค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติสิ่งแวดล้อมซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาจต้องใช้วิธีอื่นร่วมด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดี

สรุปและวิจารณ์ผล

การกำจัดสีย้อมกกด้วยกระบวนการเฟนตัน ออกซิเดชันร่วมคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งทำให้โมเลกุลน้ำสลายตัวเป็น $H^{\bullet}$, $HO_2^{\bullet}$ และ $OH^{\bullet}$ เพิ่มการเกิดกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันเมื่อใช้ H_2O_2 10 มิลลิลิตรต่อลิตร Fe^{2+} 1.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 1.5 กรัมต่อลิตร คลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 80 เฮิร์ตซ์ 90 วัตต์ นาน 30 นาที กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 92.28±0.90 ลดค่าซีโอดีร้อยละ 52.51±0.69 และมี Fe^{2+} เหลืออยู่ในระบบ 0.315±4.23 กรัมต่อลิตร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม. *ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 133 ตอนพิเศษ 129ง*, 17-21.

Asghar, A., Ramzan, N., Jamal, B. U., Maqsood, M., Sajjadi, B., & Chen, W. Y. (2019). Low frequency ultrasonic-assisted Fenton oxidation of textile wastewater: Process optimization and electrical energy evaluation. *Water and Environment Journal, 1-13*. https://doi.org/10.1111/wej.12482

Barbusiński, K. (2015). The modified Fenton process for decolorization of dye wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies, 14*(3), 281-285.

Chaiyaraksa, C., & Pongruk, S. (2017). Treatment of pulp process wastewater using photo-Fenton and sono-Fenton. *Journal of Science and Technology, 25*(3), 401-411.

Hashemian, S., Tabatabaee, M., & Gafari, M. (2013). Fenton oxidation of methyl violet in aqueous solution. *Journal of Chemistry, 509097*, 1-6. https://doi.org/10.1155/2013/509097

Hsueh, C. L., Huang, Y. H., Wang, C. C., & Chen, C. Y. (2005). Degradation of azo dyes using low iron concentration of Fenton and Fenton-like system. *Chemosphere, 58*(10), 1409-1414. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.091

Kavian, N., Asadollahfardi, G., Hasanbeigi, A., Delnavaz, M., & Samadi, A. (2024). Degradation of phenol in wastewater through an integrated dielectric barrier discharge and Fenton/photo-Fenton process. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 271*, 115937. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115937

Lade, H. S., Waghmode, T. R., Kadam, A. A., & Govindwar, S. P. (2012). Enhanced biodegradation and detoxification of disperse azo dye rubine GFL and textile industry effluent by defined fungal-bacterial consortium. *International Biodeterioration and Biodegradation, 72*, 94-107. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.001

Li, B., Dong, Y. C., Zou, C., & Xu, Y. M. (2014). Iron (III)-alginate fiber complex as a highly effective and stable heterogeneous Fenton photocatalyst for mineralization of organic dye. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*, 4199-4206. https://doi.org/10.1021/ie404241r

Li, Y. S., Tai, J. L., & Hua, C. (2009). Degradation of C.I. Acid Red 88 aqueous solution by combination of Fenton's reagent and ultrasound irradiation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 84*, 578-583. https://doi.org/10.1002/jctb.20

Neppolian, B., Park, J. S., & Choi, H. C. (2004). Effect of Fenton-like oxidation on enhanced oxidative degradation of para-chlorobenzoic acid by ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry, 11*(5), 273-279. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2003.11.001

Neyens, E., & Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials, 98*, 33-50. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00282-0

Patil, A. D., & Raut, P. D. (2014). Treatment of textile wastewater by Fenton's process as an advanced oxidation process. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 8*(10), 29-32. https://doi.org/10.9790/2402-081032932

Punzi, M., Anbalagan, A., Borner, R. A., Svensson, B. M., Jonstrup, M., & Mattiasson, B. (2015). Degradation of a textile azo dye using biological treatment followed by photo-Fenton oxidation: Evaluation of toxicity and microbial community structure. *Chemical Engineering Journal, 270*, 290-299. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.042

Qin-He, D., Wang, L. F., Jiang, H., & Yu, H. Q. (2015). A Fenton-like process for the enhanced activated sludge dewatering. *Chemical Engineering Journal, 272*, 128-134. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.034

Slama, H., Masmoudi, G., Fizer, M., Mariychuk, R., & Dhaouadi, H. (2024). Comprehensive study of Fenton reaction efficiency on textile wastewater treatment from dye solution to real effluent with emphasis on Fukui function analysis. *Journal of Molecular Liquids, 402*, 124773. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124773

Suhan, M. B. K., Mahtab, S. M. T., Aziz, W., Akter, S., & Islam, M. S. (2021). Sudan black B dye degradation in aqueous solution by Fenton oxidation process: Kinetics and cost analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 4*(3), 100126. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100126

Sun, J. H., Sun, S. P., Sun, J. Y., Sun, R. X., Qiao, L. P., Guo, H. Q., & Fan, M. H. (2007). Degradation of azo dye acid black 1 using low concentration iron of Fenton process facilitated by ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry, 14*, 761-766. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.12.010

Tavares, M. G. R., Santos, D. H. S., Tavares, M. G., Duarte, J. L. S., Meili, L., Pimentel, W. R. O., Tonholo, J., & Zanta, C. L. P. S. (2020). Removal of reactive dyes from aqueous solution by Fenton reaction: Kinetic study and phytotoxicity tests. *Water, Air, & Soil Pollution, 231*, 82. https://doi.org/10.1007/s11270-020-4465-6

Wang, W. M., Li, X. Z., Du, X., & Fu, Q. Y. (2022). A feasible approach for azo dye degradation using natural magnetite in heterogeneous Fenton oxidation. *Water Cycle, 3*, 100-105. https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.06.002

การตรวจสอบรอยนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวที่ไม่ดูดซับด้วยผงชายา (*Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh)

Latent fingerprint investigation on non-porous surfaces using chaya powder (*Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh)

เกสรา สุขหงษ์[1], สุภวรรณ พันสิ้ว[2] และ เกษศิรินทร์ เอกสินิทธ์กุล[1*]
Kessara Sukhong[1], Supawan Phansiw[2] and Gedsirin Eksinitkun[1*]

Received: 6 February 2024 ; **Revised**: 30 April 2024 ; **Accepted**: 28 May 2024

บทคัดย่อ

ลายนิ้วมือแฝงเป็นหลักฐานสำคัญในการตรวจพิสูจน์อัตลักษณ์บุคคลสามารถระบุตัวผู้กระทำความผิดได้ การตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยวิธีปัดผงฝุ่นเป็นเทคนิคที่ง่ายและรวดเร็ว งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนโดยใช้ผงผักชายาที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติที่หาได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมือ ผู้วิจัยทำการศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของผงผักชายาและช่วงน้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือ ผลการวิจัยพบว่าผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาค 49 ไมโครเมตร และช่วงน้ำหนัก 300-500 กรัม ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนกระจกใสได้ดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนทั้งหมด 10 ชนิด พบว่าสามารถสังเกตเห็นความคมชัดของลายนิ้วมือได้ชัดเจน แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงมากกว่า 45 จุด ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์ยืนยันตัวบุคคลและศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อลายนิ้วมือแฝงบนตัวแทนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 4 ชนิด โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน พบว่าคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวต่าง ๆ แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือมากกว่า 28 จุดขึ้นไป สามารถนำมาใช้ในการตรวจพิสูจน์เพื่อยืนยันตัวบุคคลได้

คำสำคัญ: ลายนิ้วมือแฝง, พื้นผิวไม่มีรูพรุน, ผักชายา, ระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ

Abstract

Latent fingerprints are important evidence to identify offenders at the crime scene. Detecting latent fingerprints by dusting method is a simple and fast technique. This research studied the detection of latent fingerprints on non-porous surfaces using Chaya powder (*Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh), a natural product that is easily available and non-toxic to fingerprint identification officers. We studied the particle size of Chaya powder and the weight range for fingerprint impressions. The result showed that the Chaya powder that passed the sieve a particle size of 49 micrometers and a weight range of 300-500 grams produced the best quality of latent fingerprints on clear glass. Moreover, the quality of latent fingerprints was studied on 10 types of non-porous surfaces. The results showed that the fingerprints were visible clearly and showed more than 45 unique characteristics of minutiae. This is sufficient to verify identity and to study the effect of time on latent fingerprints on four types of non-porous surfaces. The periods of sample collection were set at 1, 7, 14, 21, and 28 days. The results showed that more than 28 unique characteristics of minutiae were used in fingerprint identification.

Keywords: Latent fingerprint, Non-porous surfaces, Chaya, Mini AFIS

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
[2] ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 1 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
[1] Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University (Kamphaeng-Saen Campus), Nakhon-Pathom 73140, Thailand.
[2] Scientific Crime Detection Center 1 Khlong Nueng Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani Province 12120, Thailand.
* Corresponding author. E-mail: Gedsirin.e@ku.th

บทนำ

ในปัจจุบันการก่อเหตุอาชญากรรมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การก่อเหตุบางครั้งเกิดขึ้นในยามวิกาลทำให้ไม่มีพยานบุคคลที่พบเห็นเหตุการณ์การกระทำความผิดนั้น จึงไม่สามารถลงโทษผู้กระทำความผิดได้ กระบวนการยุติธรรมจึงให้ความสำคัญกับวัตถุพยานที่ผ่านการตรวจพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ (ขวัญใจ ยิ่งเจริญ, 2561) ซึ่งพยานหลักฐานสำคัญที่ผู้กระทำความผิดมักทิ้งร่องรอยจากการสัมผัสเกิดเป็นรอยประทับบนพื้นผิววัตถุมากที่สุด คือ ลายนิ้วมือแฝง

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลด้านลายพิมพ์นิ้วมือมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล (โศภชา สิงห์ทอง, 2558) โดยหลักการทางวิทยาศาสตร์พิสูจน์ได้แล้วว่าลายพิมพ์นิ้วมือของแต่ละบุคคลจะไม่ซ้ำกันและไม่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่เกิดจนเสียชีวิต ทำให้สามารถระบุอัตลักษณ์บุคคลได้อย่างชัดเจนและแม่นยำนำไปสู่การจับกุมตัวผู้กระทำความผิดได้ (Eckert, 1997)

การตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงมีด้วยกันหลายวิธี อาทิเช่น การปัดผงฝุ่น การใช้น้ำยาเคมี การรมควันซุปเปอร์กลู การลอกลายนิ้วมือ และการถ่ายภาพ เป็นต้น (รัชดาภรณ์ เบญจวัฒนานนท์, 2559) การเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประเภทของรอยลายนิ้วมือแฝง และพื้นผิวของวัตถุ เช่น วัตถุพยานเป็นกระดาษซึ่งเป็นพื้นผิวมีรูพรุนสามารถใช้วิธีสเปรย์สารละลายนินไฮดริน ในส่วนของพื้นผิวไม่มีรูพรุน อาทิเช่น แก้ว กระจก พลาสติก เหมาะกับการตรวจเก็บด้วยวิธีปัดผงฝุ่น หรือวิธีรมควันซุปเปอร์กลู วิธีที่ถูกนำมาตรวจหาลายนิ้วมือแฝงมากที่สุด คือ การปัดผงฝุ่น ซึ่งผงฝุ่นที่นำมาใช้ในปัจจุบันมีทั้งผงฝุ่นดำ ผงฝุ่นขาว ผงฝุ่นเรืองแสง ผงฝุ่นแม่เหล็ก เป็นต้น โดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจของผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมือเมื่อถูกใช้เป็นระยะเวลานาน (Sodhi & Kaur, 2001) ทั้งนี้มีผู้วิจัยจำนวนมากได้รายงานการศึกษาการนำผงฝุ่นจากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติมาใช้ในการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝง ยกตัวอย่างเช่น

ณัฏฐิรา สงฆ์โนนเหล็ก (2555) ศึกษาผงฝุ่นจากขมิ้น โดยทำการแยกขนาดผงขมิ้นในช่วงขนาดอนุภาคระหว่าง 18-153.8 ไมโครเมตร ซึ่งลักษณะพื้นผิวของผงขมิ้นเมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผงขมิ้นมีการกระจายตัวของอนุภาคไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน จึงสามารถเกาะติดรอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวได้ดี จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ผงขมิ้นอย่างเดียวและผงขมิ้นผสมยางสน 5% จะได้รอยลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพดีบนพื้นผิววัตถุชนิดต่างๆ ได้แก่ กระจก พลาสติกใสแบบอ่อน พลาสติกใสแบบแข็ง แผ่นซีดี ชามกระเบื้อง แผ่นอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษเคลือบ และปกนิตยสาร จึงสรุปได้ว่า ผงขมิ้นสามารถหารอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนได้และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ได้

รุ้งวรีย์ ทองธรรมชาติ และ วรธัช วิชชุวาณิชย์ (2562) ศึกษาผงฝุ่นจากแกลบดำสำหรับการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวเรียบไม่มีรูพรุน 3 ประเภท ได้แก่ กระจก พลาสติก และโลหะ ใช้แรงกดประทับ 300 กรัม พบว่า ผงฝุ่นจากแกลบดำสามารถตรวจหาลายนิ้วมือแฝงได้ทุกพื้นผิว โดยเฉพาะบนพื้นผิวกระจก สังเกตเห็นลายนิ้วมือแฝงได้คมชัดสมบูรณ์ที่สุด

Sri *et al.* (2019) ศึกษาผงฝุ่นจากแกมเบียร์ขนาดอนุภาคต่างๆ โดยใช้ตะแกรงแยกขนาดอนุภาคที่ขนาด 0.150, 0.149, 0.177, และ 0.250 มม. บนพื้นผิววัตถุ 5 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมฟอยล์ สไลด์แก้ว ถ้วยพลาสติก แผ่นซีดี และพลาสติกใส พบว่า ผงแกมเบียร์ที่ขนาดอนุภาค 0.250 มม. เหมาะสำหรับตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนสไลด์แก้วและพลาสติกใส และขนาดอนุภาค 0.125 มม. ปรากฏลายนิ้วมือแฝงได้ดีบนพื้นผิวถ้วยพลาสติก แผ่นซีดี และอะลูมิเนียมฟอยล์ เนื่องจากผงแกมเบียร์สามารถปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิววัตถุที่แห้งและไม่มีรูพรุนได้โดยคุณภาพของผงแกมเบียร์ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคผงแกมเบียร์ที่บดละเอียด รวมถึงประเภทของพื้นผิวที่เลือกใช้ด้วย

สมหมาย แสงแก้ว (2556) ศึกษาผงฝุ่นจากถ่านหินในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนวัตถุพื้นผิวไม่มีรูพรุน ได้แก่ กระจก กระดาษเคลือบมัน และแฟ้มพลาสติก พบว่าผงถ่านหินที่ทำการเตรียมขึ้น มีสีน้ำตาลและมีขนาดอนุภาคระหว่าง 26 ไมโครเมตร ถึง 154 ไมโครเมตร นำมาผสมกับยางสนที่มีส่วนช่วยให้ผงฝุ่นติดกับรอยลายนิ้วมือได้ดีขึ้น พบว่าสามารถตรวจหาลายนิ้วมือแฝงได้ดีบนพื้นผิวกระจกและกระดาษเคลือบมัน เป็นต้น

ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการนำผงฝุ่นจากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติ คือ ผักชายา มาใช้ในการตรวจ หาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน ซึ่งผักชายามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cnidoscolus chayamansa* Mc Vaugh พืชวงศ์ Euphorbiaceae มีถิ่นกำเนิดในประเทศเม็กซิโก ประเทศไทยเรียกกันหลายชื่อ เช่น คะน้าเม็กซิโก ผักชายา กกแซ่บ เป็นต้น ผักชายาเป็นไม้พุ่ม ปลูกง่ายและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว ลำต้นมีลักษณะอวบน้ำ และมีน้ำยางสีขาวอยู่ภายใน ใบของพืชชนิดนี้ประกอบด้วยโปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ กรดอะมิโน และกรดไขมัน และมีสารประกอบฟีนอลิก เทอร์พีนอยด์ อัลคาลอยด์ และไซยาโนเจนไกลโคไซด์ (Pérez-González *et al.*, 2021)

โดยปัจจุบันมีการนำใบผักชายามาศึกษาทาง ด้านอาหารและทางด้านการแพทย์ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำในการผลิตและมีความปลอดภัย โดยมีรายงานการนำผักชายามาศึกษาสารประกอบที่อยู่ในใบชายาเพื่อเพิ่มรสชาติอาหาร (Hutasingh

et al., 2023) รวมถึงมีการรายงานการนำใบชายามาพัฒนาและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากใบชายามีปริมาณโปรตีนสูงสามารถใช้ทดแทนโปรตีนจากสัตว์ได้บางส่วน (Ramirez-Rodrigues *et al.*, 2021) นอกจากนี้มีรายงานการนำผักชายาไปใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ เพื่อนำไปใช้ในการรักษาโรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคระบบทาง เดินอาหาร และนิ่วในไต (Avila-Nava *et al.*, 2023)

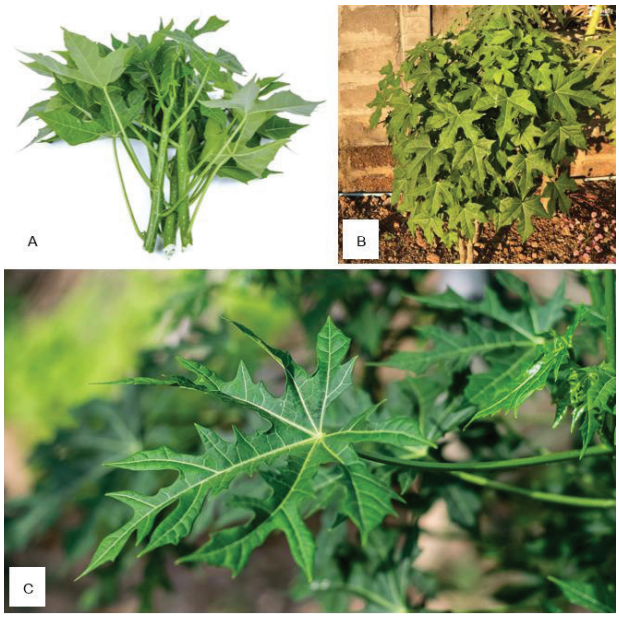


Figure 1 A) Immature chaya leaf B) Chaya shrub C) Chaya leaf

(ไทยรัฐออนไลน์, 2564)

ผู้วิจัยจึงสนใจประยุกต์ใช้พืชชนิดนี้ในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง เนื่องจากผักชายามีส่วนประกอบของยางที่มีความเหนียว เมื่อนำไปทำให้แห้งขนาดอนุภาคของผงฝุ่นสามารถยึดติดกับสารชีวโมเลกุลบนลายนิ้วมือแฝงได้ดี เพื่อสามารถนำไปใช้ในการตรวจพิสูจน์ยืนยันตัวบุคคลหรืองานตรวจพิสูจน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ และช่วยลดปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานด้านการตรวจพิสูจน์ลายพิมพ์นิ้วมือและเป็นแนวทางในการเลือกใช้ผงฝุ่นที่มีต้นทุนต่ำเพื่อทดแทนการนำเข้าผงฝุ่นจากต่างประเทศ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาขนาดอนุภาคของผงผักชายาที่เหมาะสมสำหรับการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง

2. เพื่อศึกษาน้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง

3. เพื่อศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 10 ชนิด

4. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน

5. เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพลายนิ้วมือแฝงจากผงผักชายา ผงฝุ่นทางการค้า และหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

เตรียมตะแกรงร่อน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดอนุภาค 49, 74 และ 149 ไมโครเมตร และพื้นผิวไม่มีรูพรุน 10 ชนิด ได้แก่ กระจกใส อะคริลิกใส อะคริลิกดำ พลาสติก โลหะ อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมฟอยล์ ซีดี ใบมีดคัตเตอร์ และมีด รวมถึงใช้แปรงปัดฝุ่นขนกระรอก เครื่องบด ตาชั่ง สเกลวัดขนาด กล้องถ่ายภาพ (Cannon รุ่น D700 Len EFS 18-55 mm.) และระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติขนาดพกพา (mini-AFIS)

การเตรียมผงฝุ่น

นำส่วนยอดของผักชายา ล้างทำความสะอาดและทำให้แห้งโดยการอบแห้ง จากนั้นบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นพร้อมแยกขนาดอนุภาคโดยผ่านตะแกรงร่อน 3 ขนาด จากนั้นบรรจุใส่ภาชนะที่แห้งและมีฝาปิดพร้อมปิดฉลาก จัดเตรียมผงฝุ่นทางการค้าและหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณภาพลายนิ้วมือแฝงต่อไป

การเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝง

ผู้วิจัยทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงจากนิ้วหัวแม่มือด้านขวาของบุคคลเพศหญิง 1 คน อายุ 27 ปี (ของผู้วิจัยเท่านั้น) โดยทำการล้างมือให้สะอาดด้วยสบู่และเช็ดให้แห้ง (กิรดา ขานโบ และคณะ, 2564) ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลองจากนั้นประทับนิ้วมือบนใบหน้าบริเวณหน้าผาก ก่อนกดประทับนิ้วมือลงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนด้วยน้ำหนักการกดประทับนิ้วมือที่เลือกใช้ และเก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงในอุณหภูมิห้องตามระยะเวลาที่กำหนดและทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (เนตรนภา พิมพาพร และ พัชรา สินลอยมา, 2564)

วิธีการศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยมีขั้นตอนการศึกษาและรวบรวมข้อมูล ดังนี้

1) ศึกษาขนาดอนุภาคของผงผักชายาที่เหมาะสมสำหรับการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เตรียมผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาค 49, 74 และ 149 ไมโครเมตร และทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวกระจก จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง) เก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 วัน แล้วนำแปรงปัดผงผักชายาที่เตรียมไว้ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการถ่ายภาพและบันทึกภาพเพื่อนำเข้าระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติขนาดพกพา (mini-AFIS) โดยทำการวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดอนุภาค

ที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่ดีที่สุด นำไปศึกษาน้ำหนักการกดประทับในหัวข้อถัดไป

2) ศึกษาน้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง เนื่องจากงานวิจัยนี้เลือกช่วงน้ำหนักการกดประทับนิ้วมือทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ 300-500 กรัม 600-800 กรัม และ 900-1100 กรัม ทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวกระจก จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง) เก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดใช้แปรงปัดด้วยผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาคที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุด ตามผลการทดลองที่ 1)

3) เพื่อศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 10 ชนิด ได้แก่ กระจก อะคริลิกใส อะคริลิกดำ พลาสติก โลหะ อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมฟอยล์ ซีดี ใบมีดคัตเตอร์ และมีด ทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนแต่ละพื้นผิว จำนวนพื้นผิวละ 1 ตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง) โดยเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับนิ้วมือ ตามผลการทดลองที่ 2) เก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 วัน ก่อนนำมาตรวจหาลายนิ้วมือแฝงโดยใช้แปรงปัดด้วยผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาคที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุด ตามผลการทดลองที่ 1)

4) ศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 4 ชนิด ได้แก่ กระจก พลาสติก เหล็ก และอะลูมิเนียมฟอยล์ ทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนแต่ละพื้นผิว พื้นผิวละ 5 ตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับนิ้วมือ ตามผลการทดลองที่ 2) เก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน หลังจากครบระยะเวลาที่กำหนดใช้แปรงปัดด้วยผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาคที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุด ตามผลการทดลองที่ 1)

5) เปรียบเทียบคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากผงผักชายา ผงฝุ่นทางการค้า และหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ โดยทำการเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวกระจก จำนวน 3 ตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รวมทั้งหมด 9 ตัวอย่าง) โดยเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับนิ้วมือ ตามผลการทดลองที่ 2) เก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 วัน เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดใช้แปรงปัดด้วยผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาคที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุดตามผลการทดลองที่ 1) และผงฝุ่นทางการค้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ผงฝุ่นดำและผงฝุ่นขาวด้วยแปรงปัดฝุ่นขนกระรอก จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์คุณภาพลายนิ้วมือแฝงโดยอาศัยหลักการแปลค่าคะแนนเฉลี่ยของจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝง (Minutiae) ที่ตรวจพบจากตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน โดยแบ่งช่วงระดับคะแนนออกเป็น 4 ระดับ เพื่อใช้อธิบายความหมายของระดับคุณภาพของการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงโดยประยุกต์จากงานวิจัยของนันทกาล ตาลจินดา (2556) ซึ่งมีวิธีดังนี้

$$\text{ความกว้าง} = \frac{\text{จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่ตรวจพบสูงสุด-จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษที่ตรวจพบต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้น}}$$

$$= \frac{60-28}{4}$$

$$= 8$$

ดังนั้น ช่วงความกว้างของแต่ละระดับชั้นเท่ากับ 8 ซึ่งสามารถแบ่งตามเกณฑ์ได้ดัง Table 1

Table 1 Criteria for grading the quality of complete clarity of fingerprint lines.

Minutiae	Grade	Description
53-60	A	The clarity quality of the fingerprints is very high.
45-52	B	The quality of the fingerprint clarity is high.
37-44	C	The quality of the fingerprint clarity is average.
28-36	D	The quality of the fingerprint clarity is low.

ผลการศึกษาและอภิปราย

1) ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของผงผักชายาที่เหมาะสมสำหรับการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง ผลการทดลองพบว่า ผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาค 49 ไมโครเมตร ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 59 จุด มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูงมาก (ระดับ A) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.06 ส่วนผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาคที่ 149 และ 74 ไมโครเมตร พบค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงใกล้เคียงกันที่ 50 จุด มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูง (ระดับ B) ดัง Table 2 และ Figure 2

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผงฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าและยึดเกาะกับสารชีวโมเลกุลบนเส้นลายนิ้วมือได้ดีกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ ทำให้สังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้อย่างชัดเจนและคมชัดที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เฉพาะผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาค 49 ไมโครเมตร หรือ ผงผักชายาที่มีขนาดอนุภาค £ 49 ไมโครเมตร สำหรับการทดลองหัวข้อถัดไป

Table 2 Experimental results on the particle size of Chaya powder affecting the quality of latent fingerprints.

Particle (μm)	Special Characteristics of Minutiae					
	Test 1	Test 2	Test 3	$\bar{X}$	S.D.	Grade
149	48	50	52	50	2.00	B
74	49	51	51	50	1.15	B
49	56	58	62	59	3.06	A

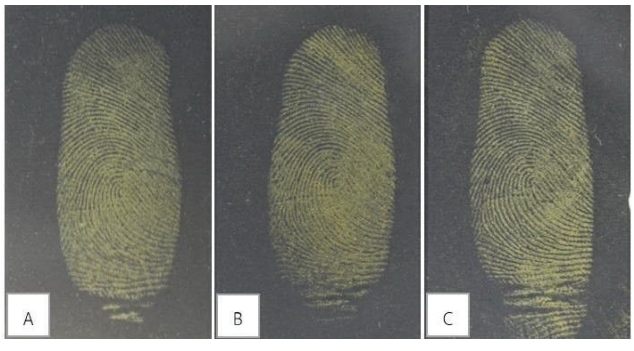


Figure 2 Particle size of Chaya powder A) 149 μm B) 74 μm C) 49 μm

2) ผลการศึกษาน้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือที่ส่งผลต่อคุณภาพการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง ผลการทดลองพบว่าช่วงน้ำหนักการกดประทับนิ้วมือ 300-500 กรัม ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ดีที่สุด แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝง 53 จุด มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูงมาก (ระดับ A) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.65 ดัง Table 3

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับนิ้วมือที่มากเกินไปทำให้เส้นนูนและเส้นร่องบนลายนิ้วมือบางส่วนไม่แยกออกจากกันส่งผลต่อความคมชัดของลายนิ้วมือ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับนิ้วมือเฉพาะช่วงน้ำหนัก 300-500 กรัม สำหรับการทดลองหัวข้อถัดไป เพื่อควบคุมน้ำหนักการกดประทับตัวอย่างลายนิ้วมือลงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน

Table 3 Experimental results of the imprinting weight affecting the quality of latent fingerprints.

Weight (g)	Special Characteristics of Minutiae					
	Test 1	Test 2	Test 3	$\bar{X}$	S.D.	Rate
300-500	51	52	56	53	2.65	A
600-800	49	51	55	52	3.06	B
900-1100	43	45	48	45	2.52	B

3) ผลการศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 10 ชนิด ได้แก่ กระจกใส อะคริลิกใส อะคริลิกดำ พลาสติก เหล็ก อะลูมิเนียม อะลูมิเนียมฟอยล์ ใบมีดคัตเตอร์ ซีดี และมีด ผลการทดลองพบว่า พื้นผิวไม่มีรูพรุนที่ปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ชัดเจนที่สุด คือ พลาสติก ซีดี และอะลูมิเนียมฟอยล์ ตามลำดับ แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 60, 54 และ 53 จุด ตามลำดับ มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูงมาก (ระดับ A) และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.15, 1.15 และ 1.73 ตามลำดับ ซึ่งพื้นผิวไม่มีรูพรุนอีก 7 ชนิด มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูง (ระดับ B) โดยสามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจน แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงมากกว่า 45 จุดขึ้นไป ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์ยืนยันตัวบุคคล ดัง Table 4 และ Figure 3

Table 4 Results of the experiment on the quality of latent fingerprints on non-porous surfaces.

Surface	Special Characteristics of Minutiae					
	Test 1	Test 2	Test 3	$\bar{X}$	S.D.	Rate
Clear Glass	49	51	56	52	3.61	B
Plastic	59	59	61	60	1.15	A
Clear Acrylic	51	51	51	51	0.00	B
Black Acrylic	42	45	47	45	2.52	B
Aluminum	50	52	53	52	1.53	B
Steel	44	46	47	46	1.53	B
CD	53	55	55	54	1.15	A
Foil	51	54	54	53	1.73	A
Cutter Blade	50	50	51	50	0.58	B
Knife	49	52	56	52	3.51	A

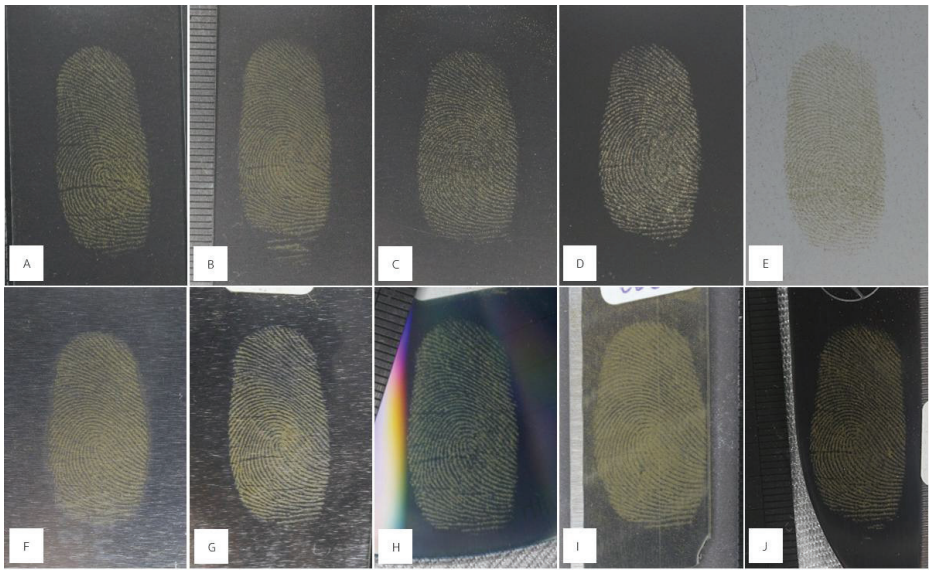


Figure 3 The quality of latent fingerprints on non-porous surfaces. (A) Clear Glass (B) Plastic (C) Clear Acrylic (D) Black Acrylic (E) Steel (F) Aluminum (G) Foil (H) CD (I) Cutter Blade (J) Knife

4) ศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 4 ชนิด ได้แก่ กระจก พลาสติก เหล็ก และอะลูมิเนียมฟอยล์ ผู้วิจัยทำการเก็บรักษาตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงในอุณหภูมิห้องเมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ผลการทดลองพบว่า

ที่ช่วงระยะเวลา 1 ถึง 7 วัน พบว่า พื้นผิวพลาสติกแสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงสูงที่สุด คือ 56 และ 54 จุด ตามลำดับ (ระดับ A) ส่วนพื้นผิวอะลูมิเนียมฟอยล์ แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงเท่ากันที่ 53 จุด (ระดับ A) ซึ่งพื้นผิวทั้ง 2 ชนิด สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้คมชัดสมบูรณ์มาก และในส่วนของพื้นผิวเหล็กและพื้นผิวกระจก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงช่วงระหว่าง 46-52 จุด (ระดับ B) สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจนและคมชัด

ที่ช่วงระยะเวลา 14 วัน พบว่า พื้นผิวอะลูมิเนียมฟอยล์และพื้นผิวกระจก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงใกล้เคียงกันที่ 52 และ 51 จุด(ระดับ B) สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจนและคมชัด ส่วนพื้นผิวเหล็ก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงใกล้เคียงกันที่ 45 จุด (ระดับ B) ซึ่งยังคงสามารถสังเกตเห็นลายนิ้วมือได้ชัดเจนและคมชัด และในส่วนของพื้นผิวพลาสติก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 44 จุด (ระดับ C) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ปานกลางและมีบางบริเวณที่อาจจะสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ยากขึ้น

ที่ช่วงระยะเวลาที่ 21 วัน พบว่า พื้นผิวอะลูมิเนียมฟอยล์ แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงสูงถึง 55 จุด (ระดับ A) ซึ่งสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้คมชัดมาก โดยมีเพียงบางบริเวณที่สังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ยากขึ้น ส่วนพื้นผิวกระจก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 50 จุด (ระดับ B) ยังคงสามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจน ส่วนพื้นผิวพลาสติก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงเท่ากับช่วงระยะเวลา 14 วัน (ระดับ C) ซึ่งสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ปานกลางและมีบางบริเวณที่สังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ยาก และในส่วนของพื้นผิวเหล็ก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 31 จุด (ระดับ D) สังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจนน้อยลง

ที่ช่วงระยะเวลาที่ 28 วัน พบว่า พื้นผิวอะลูมิเนียมฟอยล์ แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 47 จุด (ระดับ B) สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ชัดเจนและคมชัด มีเพียงบางบริเวณที่สังเกตเส้นลายนิ้วมือลดลงเนื่องมาจากผงฝุ่นเริ่มเกาะเป็นกลุ่ม ที่เกิดจากปัจจัยทางธรรมชาติ ส่วนพื้นผิวพลาสติกและพื้นผิวกระจก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงใกล้เคียงกันที่ 39 และ 36 จุด (ระดับ C) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้ปานกลางและบางบริเวณสังเกตเส้นลายนิ้วมือได้ยาก และในส่วนพื้นผิวเหล็กปรากฏคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้น้อยที่สุด แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงที่ 28 จุด (ระดับ D) ทำให้สังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้น้อยมากและบางบริเวณไม่สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้

จากการเปรียบเทียบช่วงระยะเวลาสังเกตได้ว่า ความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนทุกชนิดเริ่มพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงลดลงอย่างชัดเจนเมื่อตัวอย่างลายนิ้วมือถูกทิ้งไว้ที่ระยะเวลานานขึ้น ดัง Table 5 และ Figure 4-7 โดยช่วงระยะเวลาที่ 1 วัน ถึง 14 วัน ของการทดลองนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของดารณี เลยะกุล และคณะ (2563) ที่ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่ต่างกันบนพื้นผิวโลหะอะลูมิเนียม โดยใช้เทคนิคผงฝุ่นดำ และเลือกใช้น้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือที่ 1500 กรัม เก็บตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1, 3, 7, 10 และ 14 วัน ผลการวิจัยพบว่า ระยะเวลาช่วง 10 วันแรกคุณภาพของลายนิ้วมือนั้นมีความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงดี โดยเป็นระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ไม่มีผลต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝง และการศึกษาช่วงระยะเวลา 28 วัน พบว่า ค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงน้อยที่สุดที่ 28 จุด เพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์บุคคล ซึ่งมาตรฐานในการตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือเพื่อยืนยันตัวบุคคลระบุไว้ที่ 12 จุดขึ้นไปแต่ไม่ต่ำกว่า 10 จุด (Craig, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือเพื่อยืนยันตัวบุคคลของสำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่ต้องใช้จุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝง 10 จุดขึ้นไป

Table 5 Results of the experiment on the quality of latent fingerprints on non-porous surfaces for a specified period.

Surface	Time (Day)	Special Characteristics of Minutiae					
		Test 1	Test 2	Test 3	$\bar{X}$	S.D.	Rate
Glass	1	51	51	52	51	0.58	B
	7	48	51	56	52	4.04	B
	14	49	50	54	51	2.65	B
	21	47	51	51	50	2.31	B
	28	33	35	40	36	3.61	D
Plastic	1	54	56	59	56	2.52	A
	7	52	55	56	54	2.08	A
	14	43	44	46	44	1.53	C
	21	44	44	45	44	0.58	C
	28	35	37	45	39	5.29	C
Steel	1	45	47	46	46	1.00	B
	7	46	47	50	48	2.08	B
	14	41	46	48	45	3.61	B
	21	30	30	32	31	1.15	D
	28	19	31	33	28	7.57	D
Foil	1	52	54	53	53	1.00	A
	7	52	52	56	53	2.31	A
	14	51	53	52	52	1.00	B
	21	53	55	56	55	1.53	A
	28	46	46	50	47	2.31	B

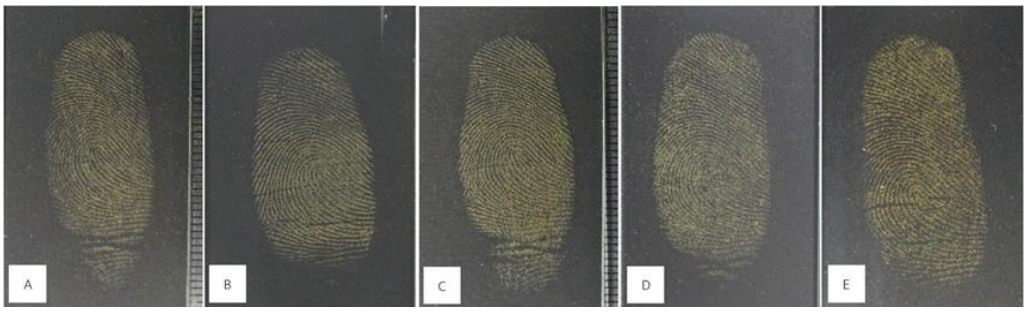


Figure 4 Quality of LFPs on glass with Chaya powder A) 1 day B) 7 days C) 14 days D) 21 days E) 28 days

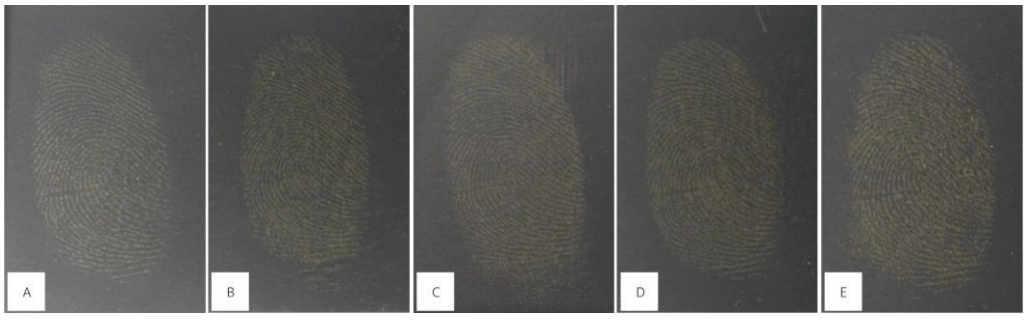


Figure 5 Quality of LFPs on plastic with Chaya powder A) 1 day B) 7 days C) 14 days D) 21 days E) 28 days

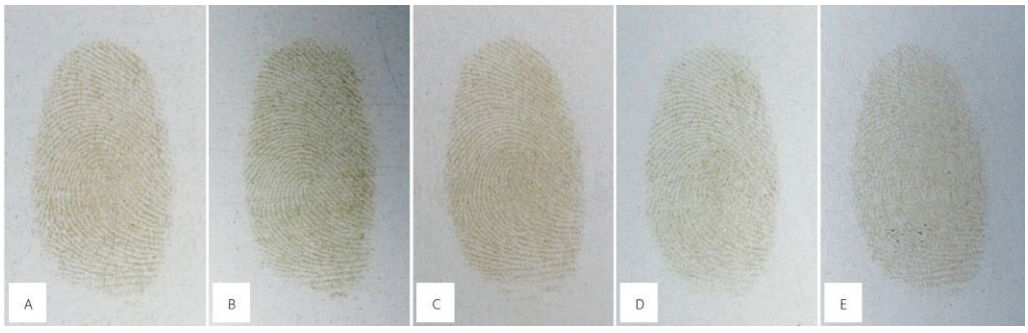


Figure 6 Quality of LFPs on steel with Chaya powder A) 1 day B) 7 days C) 14 days D) 21 days E) 28 days

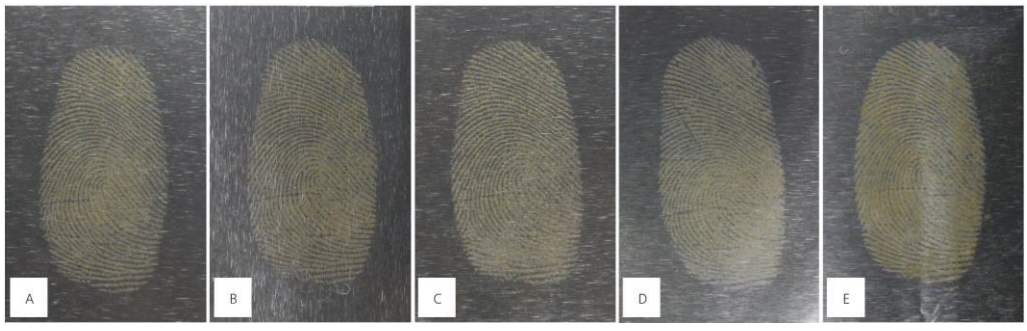


Figure 7 Quality of LFPs on foil with Chaya powder A) 1 day B) 7 days C) 14 days D) 21 days E) 28 days

5) ผลการเปรียบเทียบคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากผงผักชายา ผงฝุ่นทางการค้า และหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ ผลการทดลองพบว่า พื้นผิวกระจกที่ทำการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยผงผักชายา ผงฝุ่นดำ และผงฝุ่นขาว แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงใกล้เคียงกันที่ 58, 54 และ 56 จุด ตามลำดับ มีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูงมาก (ระดับ A) สามารถสังเกตเห็นเส้นลายนิ้วมือได้คมชัดสมบูรณ์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่ได้จากผงผักชายากับหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือที่แสดงเส้นลายนิ้วมือใกล้เคียงกับลายพิมพ์นิ้วมือจริงได้ชัดเจนและถูกต้องแม่นยำที่สุด พบว่า แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงเท่ากันที่ 58 จุด และมีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูงมาก (ระดับ A) ดัง Table 6 และ Figure 8

Table 6 Comparing the quality of fingerprints with Chaya powder, Commercial dust, and fingerprint ink.

Powder/Ink	Special Characteristics of Minutiae					
	Test 1	Test 2	Test 3	$\bar{X}$	S.D.	Rate
Chaya Powder	56	57	62	58	3.21	A
White Powder	53	55	55	54	1.15	A
Black Powder	53	58	58	56	2.89	A
fingerprint ink	56	57	61	58	2.65	A

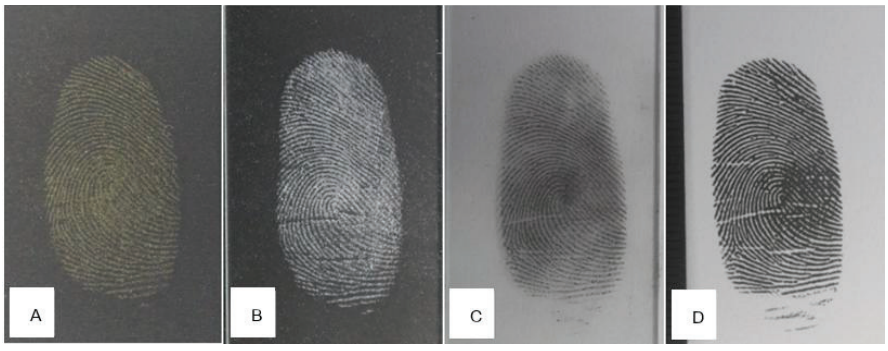


Figure 8 Detection of LFPs with fingerprint powder from (A) Chaya powder (B) White powder (C) Black powder (D) fingerprint ink.

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยนำผงผักชายามาประยุกต์ใช้ในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน สรุปได้ว่าผงผักชายาที่ผ่านตะแกรงขนาดอนุภาค 49 ไมโครเมตร รวมถึงการควบคุมน้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือช่วงน้ำหนัก 300-500 กรัม ให้ผลการตรวจหาคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวกระจกใสได้ดีที่สุด เนื่องจากการใช้น้ำหนักการกดประทับลายนิ้วมือที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เส้นนูนและเส้นร่องไม่แยกออกจากกันอย่างชัดเจนส่งผลให้ความชัดเจนสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงลดน้อยลง รวมถึงเงื่อนไขจากปัจจัยการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติ อาทิเช่น สภาพอากาศ อุณหภูมิ ปริมาณเหงื่อและไขมันบริเวณนิ้วมือ ความเครียด เป็นต้น จึงส่งผลต่อการตรวจหาคุณภาพลายนิ้วมือแฝงมีความยากขึ้น

เมื่อทำการศึกษาการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยผงผักชายาบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 10 ชนิด หลังจากเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงและเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่าพื้นผิวไม่มีรูพรุนทั้งหมดสามารถตรวจหาคุณภาพลายนิ้วมือแฝงได้ และมีระดับความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงในระดับสูง ถึง สูงมาก แสดงค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงมากกว่า 45 จุดขึ้นไป จากการทดลองพื้นผิวไม่มีรูพรุนที่ปรากฏลายนิ้วมือแฝงชัดเจนดีที่สุด ได้แก่ พลาสติก ซีดี และอะลูมิเนียมฟอยล์ ตามลำดับ

ศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝง โดยเตรียมตัวอย่างลายนิ้วมือแฝงบนตัวแทนพื้นผิวไม่มีรูพรุน 4 ชนิด สังเกตได้ว่า ช่วงระยะเวลา 1 วัน ถึง 14 วัน ความคมชัดสมบูรณ์ของลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนทุกชนิดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งไม่ส่งผลต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝง และช่วงระยะเวลา 21 วัน เริ่มมีแนวโน้มการเปลี่ยน แปลงของค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงลดลง และลดลงอย่างชัดเจนเมื่อตัวอย่างลายนิ้วมือถูกทิ้งไว้บนพื้นผิวไม่มีรูพรุนที่ระยะเวลาผ่านไป 28 วัน ซึ่งค่าเฉลี่ยจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายนิ้วมือแฝงมากกว่า 10 จุดทุกพื้นผิว ซึ่งเพียงพอต่อการตรวจพิสูจน์เพื่อยืนยันตัวบุคคลได้

ตรวจสอบประสิทธิภาพการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงโดยการเปรียบเทียบผงผักชายากับผงฝุ่นทางการค้า (ผงฝุ่นขาวและผงฝุ่นดำ) พบว่า ประสิทธิภาพในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงด้วยผงผักชายามากกว่าผงฝุ่นทางการค้า และเมื่อเปรียบเทียบกับหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือ พบว่าประสิทธิภาพในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงเทียบเท่ากับหมึกพิมพ์ลายนิ้วมือที่แสดงเส้นลายนิ้วมือใกล้เคียงกับลายพิมพ์นิ้วมือจริงได้ชัดเจนและถูกต้องแม่นยำที่สุด แสดงให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้มีประสิทธิภาพในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงและมีคุณภาพเพียงพอสำหรับการพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลด้านลายพิมพ์นิ้วมือ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้ผงฝุ่นจากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในการตรวจ หาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุน เพื่อประโยชน์ด้านนิติวิทยาศาสตร์และกระบวนการยุติธรรมต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ควรมีการเก็บวัตถุพยานจริงมาทดสอบการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด ซึ่งอาจจะมีผลกระทบในเรื่องของแรงกดประทับบนพื้นผิวสภาพอากาศหรือสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการคงอยู่ของลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิววัตถุนั้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัยมุ่งเป้า และคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ขอขอบคุณ ศูนย์ตรวจพิสูจน์หลักฐาน 1 จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติแบบพกพา ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กิรดา ขานโบ, กิตติธัช ธนสิวะวงษ์, เขมฤทัย ถามะพัฒน์, ศิริประภา รัตตัญญู, สุรินทร์ ชมเสาร์หัศ, พัชรา สินลอยมา, & พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. (2564). ผงฝุ่นวาวแสงจากแกลบสำหรับเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝง. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 16*(2), 67-80.

ขวัญใจ ยิ่งเจริญ. (2561). ความเข้าใจและการใช้นิติวิทยาศาสตร์ในการสอบสวนคดีอาชญากรรมเฉพาะทางของพนักงานสอบสวน. [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.

ณัฏฐิรา สงฆ์โนนเหล็ก. (2555). การทำให้ปรากฏขึ้นของรอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวไม่มีรูพรุนโดยใช้ผงขมิ้น. [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร]. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ดารณี เลยะกุล, ณิช วงศ์ส่องจ้า, & ณรงค์ กุลนิเทศ. (2563). การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่ระยะเวลาต่างกัน โดยวิธีปัดผงฝุ่นดำ. *วารสารวิชาการอาชญาวิทยาและนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ, 6*(1), 77-90.

ไทยรัฐออนไลน์. (2564, 6 มกราคม). สกู๊ปไทยรัฐ: คะน้าเม็กซิโก ใช้แทนผงชูรส ลดไตเสื่อม ป้องกัน 4 โรคฮิตคนไทย. *ไทยรัฐ*.

นันทกาล ตาลจินดา. (2556). “การตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลด้วยวิธีการรมไอโอดีน, วิธีนินไฮดริน และวิธี 1,2 อินเดนไดโอน.” *Veridian E Journal Silpakorn University, 6*(1), 808-816.

เนตรนภา พิมพาพร, & พัชรา สินลอยมา. (2564). การพัฒนาผงฝุ่นจากกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้ในการตรวจลายนิ้วมือแฝง. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 13*, 199-213.

รัชดาภรณ์ เบญจวัฒนานนท์. (2559). *นิติวิทยาศาสตร์พิสูจน์เอกลักษณ์บุคคล* (พิมพ์ครั้งที่ 1). คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

รุ้งวรีย์ ทองธรรมชาติ, & วรธัช วิชชุวาณิชย์. (2562). การพัฒนาผงฝุ่นจากแกลบดำในการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน. *วารสารวิชาการอาชญาวิทยาและนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ, 5*(2), 87-103.

โศภชา สิงห์ทอง. (2558). ลายนิ้วมือกับการพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคล. *วารสารวิชาการแพรวากาฬสินธุ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์, 2*, 52-63.

สมหมาย แสงแก้ว. (2556). การผลิตผงฝุ่นจากถ่านหินและการประเมินผลการใช้ตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝง. *วารสาร Veridian E-Journal มหาวิทยาลัยศิลปากร, 6*(1), 829-839.

Avila-Nava, A., Acevedo-Carabantes, J. A., Alamilla-Martinez, I., Tobón-Cornejo, S., Iván, T. V., Tovar, A. R., Torres, N., & Noriega, L. G. (2023). Chaya (Cnidoscolus aconitifolius (Mill.) I.M. Johnst) leaf extracts regulate mitochondrial bioenergetics and fatty acid oxidation in C2C12 myotubes and primary hepatocytes. *Journal of Ethnopharmacology, 312*, 116522. https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116522

Craig, A. (2016). *Forensic evidence in court: Evaluation and scientific opinion*. Wiley.

Eckert, G. W. (1997). *Introduction to forensic sciences* (2nd ed.). CRC Press.

Hutasingh, N., Chuntakaruk, H., Tubtimrattana, A., Ketngamkum, Y., Pewlong, P., Phaonakrop, N., Roytrakul, S., Rungrotmongkol, T., Paemanee, A., Tansrisawad, N., Siripatrawan, U., & Sirikantaramas, S. (2023). Metabolite profiling and identification of novel umami compounds in the chaya leaves of two species using multiplatform metabolomics. *Food Chemistry, 404*, 134564. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134564

Pérez-González, M. Z., Gutiérrez-Rebolledo, G. A., Jimenez-Arellanes, M. A., & Cruz-Sosa, F. (2021). The chemical constituents and biological activities of Cnidoscolus chayamansa McVaugh, a Mexican medicinal species, and plant cell cultures for the production of bioactive secondary metabolites. *Studies in Natural Products Chemistry, 68*, 317-346. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819485-0.00009-8

Ramirez-Rodrigues, M. M., Metri-Ojeda, J. C., González-Díaz, M., & Baigts-Allende, D. K. (2021). Use of Chaya (Cnidoscolus chayamansa) leaves for nutritional compounds production for human consumption. *Journal of the Mexican Chemical Society, 65*(1). http://dx.doi.org/10.29356/jmcs.v65i1.1433

Sodhi, G. S., & Kaur, J. (2001). Powder method for detecting latent fingerprints: A review. *Forensic Science International, 120*, 172-176. https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00465-5

Sri, A. S., Hartati, N., Jasmidi, Kembaren, A., & Naji, A. M. (2019). Development of Gambir powder as a cheap and green fingerprint powder for forensic applications. *AIP Conference Proceedings, 2155*, 020023. https://doi.org/10.1063/1.5125527

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

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

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้นิพนธ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ ".doc" (MS Word) และ ".pdf" (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

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

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

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้นิพนธ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กะชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช้คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

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

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

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

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

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อนและมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้นิพนธ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

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

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

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

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

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, *18* (2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณาธิการ (บ.ก.), *ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม* (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชราภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (บ.ก.), *การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ (*น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

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

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เดลินิวส์วาไรตี้: ‘สื่อพิพิธภัณฑ์’ เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย ‘มิติใหม่’ อินเทรนด์. *เดลินิวส์*, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี*. http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73hVYlMh1cYWzQiaNl_Vc/view

Intruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

Reference are written in "Publication Manual of the American Psychilogical Association" (7th Edition)

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Mahasarakham University Journal of Science and Technology

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

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

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

Editor-in-Chief
Professor Dr.Preecha Prathepha

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

Editorial Board
Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University Professor
Professor Dr.Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Wongsa Laohasiriwong
Khon Kaen University
Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul
Khon Kaen University
Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chawalit Boonpok
Mahasarakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Nakhon Phanom University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Mahasarakham Universsity
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Walaiporn Tongjaroenbuengam
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Mahasarakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University

Secretary
Director of the Division of Research Facilitation and Dissemination

Assistant secretary
Phakwilai Janloy
Jirarat Puseerit

Six issues per year
Number 1 January-February
Number 2 March-April
Number 3 May-June
Number 4 July-August
Number 5 September-October
Number 6 November-Decembers

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 44 ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน 2568

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN