

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 41 ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน 2565

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

ISSN (Print Edition) : 1686-9664
ISSN (Online Edition) : 2586-9795



ขอบคุณภาพ จาก :

<https://thailandtourismdirectory.go.th/th/attraction/1086>

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ไบไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ศิริอมพรพรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอองศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อ่านเป็รื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงษ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ บุญยะสิทธิ์พรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนงแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิชัย กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกียรติกร ดร.รักษจินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Dr.Adrian Roderick Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ฉวีวรรณ อรรถเศรษฐ์

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัทธวิไล รุ่งวิสัย
จิราวัฒน์ 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

“**ปูลูลกระหม่อม**” หรือ “**ปูแป้ง**” เป็นปูน้ำจืดที่สามารถพบได้พื้นที่เดียว คือที่ “**เขตห้ามล่าสัตว์ป่าดูลำพัน**” อำเภอ นาเชือก จังหวัดมหาสารคาม ลักษณะเด่นของปูชนิดนี้ คือ สีของกระดองที่เป็นสีม่วงเปลือกมันเงา ขอบกระดอง ขาเดินทั้ง 4 คู่ และก้ามหนีบทั้ง 2 ข้างมีสีเหลืองส้ม ปลายขาข้อสุดท้ายและปลายก้ามหนีบมีสีขาวงาช้าง ขนาดของปูมีความ กว้างของกระดองประมาณ 3.5 เซนติเมตร ปูลูลกระหม่อมเพศผู้และเพศเมียมีลักษณะคล้ายกัน ปูชนิดนี้จะขุดรูอยู่ในที่ชื้น มีต้นไม้ปกคลุม แสงแดดรำไร ความลึกของรูขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดิน ออกหากินในเวลากลางคืน โดยจะออกมาตักเหยื่อบริเวณ รอบๆ ปากรู ในรัศมีไม่เกิน 1 เมตร อาหารส่วนใหญ่จะเป็นพืชและสัตว์ เช่น เศษใบไม้ ไล่เดือน แมลงชนิดต่างๆ ช่วงเวลา ผสมพันธุ์ของปูลูลกระหม่อม จะเริ่มตั้งแต่เดือน มิถุนายน ถึงเดือนกันยายน ซึ่งจะอยู่ในฤดูฝน โดยในฤดูผสมพันธุ์ สีสนของ ปูลูลกระหม่อมจะเด่นชัดและมีความสวยงามยิ่งขึ้น หลังจากผสมพันธุ์ได้ประมาณ 4 เดือน ที่บริเวณหน้าท้องของตัวเมียจะเริ่ม มีไข่ประมาณ 10-35 ฟอง ในช่วงต้นเดือนมกราคมถึงเมษายน ไข่อ่อนเมื่อออกมาใหม่ๆ จะมีสีเหลืองอมส้ม และเมื่อไข่แก่เต็มที่ จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มปนเทาจนเกือบดำ ตัวอ่อนจะฟักออกจากไข่ในช่วงประมาณปลายเดือน เมษายนถึงเดือนพฤษภาคม และตัวอ่อนจะติดอยู่ที่หน้าท้องแม่ระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งเข้าสู่ฤดูฝน จากนั้นลูกปูก็จะออกจากท้องแม่ไปขุดรูใหม่อาศัยของ ตัวเอง

สำหรับปูชนิดนี้ ได้มีการตรวจสอบทางวิชาการครั้งแรก โดย ศาสตราจารย์ไพบุลย์ นัยเนตร อาจารย์ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2536 โดยความร่วมมือกับผู้เชี่ยวชาญจากพิพิธภัณฑ์ประวัติศาสตร์ทาง ธรรมชาติ ประเทศเนเธอร์แลนด์ และพบว่าเป็นปูน้ำจืดชนิดใหม่ของโลก ซึ่งในปีดังกล่าว สมเด็จพระเจ้าลูกเธอเจ้าฟ้าจุฬาภรณ วัลย์ลักษณ์อัครราชกุมารี ทรงเจริญพระชนมายุครบ 36 พรรษา ในฐานะที่พระองค์ทรงเป็นผู้นำและมีพระปรีชาสามารถใน งานด้านวิทยาศาสตร์ จึงได้กราบทูลขอพระราชทานพระอนุญาตอัญเชิญพระนามของพระองค์มาเป็นชื่อของปูน้ำจืดชนิดนี้ และได้รับพระราชทานอนุญาตให้เรียกชื่อปูชนิดนี้ว่า “**ปูลูลกระหม่อม**” ซึ่งได้กลายมาเป็นชื่อเรียกของปูชนิดนี้มาจนถึงปัจจุบัน

รศ.น.สพ.ดร. วรพล เองวานิช

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ที่มา: <https://mgronline.com/travel/detail/9580000024287>



สารบัญ

Chemistry

กระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีหลังการย้อมด้วยสีจากเมล็ดคำแสด 63

A process of increasing shades after dyeing with annatto seed (*Bixa orellana* Linn.)

ปัทิตตาท์ วงศ์แสงเทียน

Patitta Wongsangthain

Computer and Information Technology

โปรแกรมการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย 69

Job shop scheduling program with genetic algorithm from multi-objective function construction based on sand pile theory

อิทธิศักดิ์ ศรีดำ

Idhisak Sridam

Engineering

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง 80

Factors affecting drying of Pathum Thani 1 paddy using a pneumatic dryer with a curved drying pipe

เจษฎา แพรกนันทโฮ, มณฑล ชูโชนาค, มุस्ताฟา ยะภา, เอนก สุทธิฤทธิ์

Jetsada Phraeknanthoe, Monthon Chuchonak, Mustafa Yapa, Anek Sutthirit

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา 90

Thermal efficiency enhancement of a heat pipe evacuated-tube solar collector by installing a compound parabolic concentrating reflector

สรวิศ สอนสารี, กฤษณา อันอ้าย

Sorawit Sonsaree, Kritsada On-ai

Health Science

การตั้งสูตรตำรับเจลจากสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดสำหรับสิวอักเสบ 103

Gel formulation from bark of *Tinospora crispa* (L.) Miers ex Hook. F. & Thomson extract for inflammatory acne

แสงเพ็ญ อินประเสริฐ, พิทักษ์ แซ่เฮ้ง, เพชรพงศ์ เพชรี, พิรุณรัตน์ เดชบำรุง, กฤษดา อนันตวุฒิกุล, นวลศรี นิวัตต์ยวงค์, อารีรัตน์ ชี้อดี

Saengpen Inprasert, Pithak Saeheng, Petchpong Petcharee, Piroonrat Dechbumroong,

Kritsada Anuntawuttikul, Nuansri Niwattisaiwong, Areerat Suedee

กระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีหลังการย้อมด้วยสีจากเมล็ดคำแสด

A process of increasing shades after dyeing with annatto seed (*Bixa orellana* Linn.)

ปัทิตตาท์ วงศ์แสงเทียน¹

Patitta Wongsangthain¹

Received: 26 January 2021 ; Revised: 19 October 2021 ; Accepted: 6 January 2022

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษากระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีย้อมธรรมชาติบนเส้นไหมหลังจากย้อมด้วยสีจากเมล็ดคำแสด คำสี ความคงทนของสีต่อการซักและต่อแสง รวมถึงการเปรียบเทียบสีย้อมในระดับต้นแบบกับสีย้อมในห้องปฏิบัติการ วิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย กระบวนการเพิ่มเฉดสีย้อมเส้นไหมด้วยสีย้อมจากเปลือกประดู่ เปลือกยางนา แก่นไม้ฝาง เปลือกไม้จ๊ว และดอกอัญชัน การวัดหาค่าเฉดสีในระบบ CIELAB การทดสอบความคงทนต่อการซักฟอกและแสง และการย้อมสีในระดับต้นแบบ ผลการศึกษา พบว่า กระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีย้อมธรรมชาติบนเส้นไหมด้วยเมล็ดคำแสดร่วมกับพืช 5 ชนิด ผลจากการย้อมสีจะได้ตัวอย่างของเส้นไหมทั้งหมดจำนวน 63 ตัวอย่างตามเงื่อนไขการย้อม ซึ่งกระบวนการเพิ่มจำนวนเฉดสีที่ดีที่สุด เกิดจากกระบวนการการย้อมด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมกับสารส้ม 0.05% จะทำให้สีเส้นไหมที่มีความสว่างมากที่สุด คำสีของเส้นไหมที่ได้มีความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 68.98-68.99 คำสีแดง-เขียว (a^*) อยู่ระหว่าง 27.70-27.75 เป็นช่วงสีแดง เกิดจากกระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมแก่นไม้ฝางผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมกับสารส้ม 0.05% และคำสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) อยู่ระหว่าง 42.99-43.00 เป็นช่วงสีเหลือง เกิดจากกระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมกับ Cu 0.5% ซึ่งสีของเส้นไหมมีความคงทนต่อแสงและการซักส่วนใหญ่อยู่ในระดับดี-ดีมาก และสีที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบไม่แตกต่างจากการย้อมในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: เฉดสี เส้นไหม เมล็ดคำแสด

Abstract

This research aimed to study the process of increasing the number of shades of natural dyed silk from seeds of annatto tree, color values, color fastness and light; and the prototype of dyeing process for household industry compared to the lab test. The method of conducting the research consisted of the process of adding shades of silk yarn dyed from natural materials, namely, Burma Padauk's bark, Yang's bark, Fang heartwood, Bombax's bark and Butterfly Pea's flower, wavelength measurement based on CIELAB color system to identify color value, color fastness to washing and light fastness test, and comparing the color value obtained from household dyeing process with the laboratory. Results showed that the process of increasing the number of shades of natural dyed silk from seeds of annatto tree with the five natural materials, as a result of dyeing, 63 silk samples were obtained according to all the dyeing conditions. The best shade multiplication process caused by the dyeing process with water to dye the seeds mixed with 0.05% alum. exhibited the color values of silk yarn dyed with annatto seed dye in terms of lightness (L^*), green/red (a^*) and blue/yellow (b^*) were as $L^* = 68.98-68.99$, $a^* = 27.70-27.75$ red, caused by the dyeing process with dye from the Fang heartwood mixed with 0.05% alum, followed by alum seed dye mixed with 0.05% alum, ($b^* = 42.99-43.00$; yellow) caused by dyeing process with The annatto seed dyeing water mixed with 0.5% Cu. The color strength of the silk yarn exhibited "very good" to color fastness to washing, to rubbing (color staining), while the fastness to light had "fair" color fading; the prototype of dyeing process for household industry yield no difference color to the lab test.

Keywords: Shade, Silk, annatto tree seeds

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติวิทยาเขตสุโขทัย, จังหวัดสุโขทัย, 64000

¹ Assistance Professor, Department of Science, Faculty of Sports and Health Sciences, Thailand National Sports University Sukhothai Campus: TNSU.STI, Sukhothai 64000

บทนำ

คำแสด (Annatto) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bixa orellana* Linn. เป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็กสูงประมาณ 3-5 เมตร เรือนยอดเป็นพุ่มกลม ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงเวียนรอบต้นรูปไข่ โคนใบมนปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือเป็นคลื่น ดอกออกเป็นช่อที่ปลายกิ่ง แต่ละช่อมี 5-10 ดอก สีชมพู กลีบรองดอกสีเขียวขนาดเล็ก มีกลีบดอก 5 กลีบ ผลรูปไข่ มีขนแข็งสีแดงคล้ายผลเงาะ เมื่อผลแก่จะแตกออกทางด้านข้างภายในมีเมล็ดและเปลือกหุ้มสีแดง (ศิริลักษณ์ วงศ์พิเชษฐ, 2556) ซึ่งในเมล็ดคำแสดมีองค์ประกอบโดยรวม คือ โปรตีน 13-17% เยื่อใย 16% ฟอสฟอรัส แคลเซียม กรดอะมิโน ที่พบ ได้แก่ Tryptophan, Lysine, Methionine, Isoleucine, Leucine, Phenylalanine และ Threonine นอกจากนี้ยังพบว่า ในเมล็ดคำแสดยังมีพวกเซลลูโลส 40-45% ซูโครส 3.5-5.5% น้ำมันหอมระเหย 0.3-0.9% น้ำมันไม่ระเหย 4.5-5.5% และสารสี 13-16% ส่วนอัลฟาและเบต้าแคโรทีนมีประมาณ 13-16 (Silva et al., 2008) เนื้อที่เคลือบเมล็ดคำแสดสามารถให้สารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์ ซึ่งสารสีหลักของคำแสด คือ Bixin และ Norbixin ให้สีส้มแดง เป็นสารที่ไม่คงตัว เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง pH หรือมีแสงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยา oxidation ซึ่งทำให้ Bixin ไม่คงตัวมากขึ้น การช่วยความคงตัวของ Bixin ทำได้โดยการผสม Curcumin Vanillin Eugenol หรือ Vitamin E (คำพอง อยู่ศรี, 2551)

การย้อมสีธรรมชาติในประเทศไทย มีทั้งที่เป็นงานหัตถกรรมทำขึ้นเพื่อไว้ใช้กันเองภายในครอบครัว และทั้งแบบที่เป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน และอุตสาหกรรมขนาดย่อมส่งไปขายทั้งในประเทศและต่างประเทศ การย้อมสีธรรมชาติในภาคเหนือของประเทศไทยจะนิยมย้อมสีธรรมชาติกับผ้าฝ้ายทอมือ ส่วนภาคอีสานจะมีการย้อมทั้งผ้าไหมและผ้าฝ้ายเพื่อใช้ในชีวิตประจำวันเป็นเครื่องนุ่งห่ม เช่น ผ้าซิ่น และเพื่อตัดเย็บเป็นเสื้อผ้าหรือเป็นของใช้ในครัวเรือน เช่น ผ้าห่ม หรือของประดับตกแต่งบ้านเรือน เป็นต้น (ปาเจรา พัฒนถาบุตร, 2551) ในปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสนใจสั่งทอย้อมสีจากธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจากสีย้อมจากธรรมชาติมีสีสดใสสวยงาม สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและมีความปลอดภัยมากกว่าสีสังเคราะห์ แต่สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติยังไม่มีสีที่หลากหลายและสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติไม่มีความคงทนต่อการซักและแสง ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของการย้อมสีเพิ่มจำนวนเจดสีย้อมธรรมชาติด้วยเมล็ดคำแสด โดยกลุ่มสีเดียวกันที่แบ่งเป็นหลายโทนสี (Monotone) ที่แบ่งเป็นหลายโทนโดยใช้การย้อมสีทับจากวัสดุธรรมชาติ เพื่อหาเจดสีใหม่ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาการเพิ่มจำนวนเจดสีย้อมจากธรรมชาติให้เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมสิ่งทอมากขึ้น สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และสร้างรายได้ให้กับชุมชนต่อไป

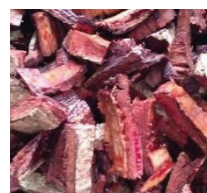
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการเพิ่มจำนวนเจดสีย้อมธรรมชาติ บนเส้นไหมจากเมล็ดคำแสด
2. เพื่อศึกษาค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด
3. เพื่อศึกษาความคงทนของสีเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด
4. เพื่อเปรียบเทียบสีย้อมในระดับต้นแบบกับสีย้อมจากห้องปฏิบัติการ

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. ส่วนของพืชที่ใช้สกัดแยกสีและนำไปย้อม ได้แก่ เมล็ดคำแสด เปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจิว และดอกอัญชัน (Figure 1) หลังจากย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสดแล้ว ดำเนินการย้อมเพื่อเพิ่มจำนวนเจดสีบนผ้าไหม มี 3 วิธี ตามที่มีในรายงานการวิจัยของ สุวิมล หงส์สาม และคณะ (2557)

วิธีที่ 1 นำเส้นไหมมาย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสดแล้วนำเส้นไหมไปตากให้แห้ง จากนั้นนำเส้นไหมมาย้อมสีทับด้วยน้ำย้อมสีจากเปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจิว และดอกอัญชัน สีที่สกัดจากเมล็ดคำแสด โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อมเมล็ดคำแสด 100 มิลลิลิตร ต่อเส้นไหม 2 กรัม ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที และน้ำย้อมสีที่สกัดจากเปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจิว และดอกอัญชัน



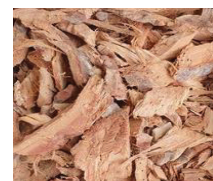
Burma Padauk bark



Yang bark



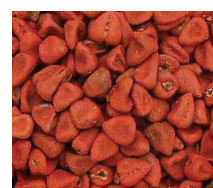
Sappan dead wood



Cotton tree bark



Butterfly pea flowers



Annatto tree seeds

Figure 1 Six material types used in this experiment.

โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อมสี 100 มิลลิลิตร ต่อเส้นไหม 2 กรัม ผสมสารช่วยติดสีในอัตราส่วนสารส้ม 0.05% และ Cu 0.5% อุณหภูมิ 70-80 °C ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที จะได้ตัวอย่างเส้นไหมตามเงื่อนไขการย้อมทั้งหมด จำนวน 20 ตัวอย่าง

วิธีที่ 2 นำเส้นไหมมาย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจ๊ว และดอกอัญชัน แล้วนำเส้นไหมไปตากให้แห้ง จากนั้นนำเส้นไหมมาย้อมสีทับด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด สีที่สกัดจาก เปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจ๊ว และดอกอัญชัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อมสี 100 มิลลิลิตร ผสมสารช่วยติดสีในอัตราส่วนสารส้ม 0.05% และ Cu 0.5% ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 70-80 °C และสีที่สกัดจากเมล็ดคำแสด โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อมเมล็ดคำแสด 100 มิลลิลิตร ต่อเส้นไหม 2 กรัม ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที จะได้ตัวอย่างเส้นไหมตามเงื่อนไขการย้อมทั้งหมด จำนวน 20 ตัวอย่าง

วิธีที่ 3 นำน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสดมาผสมกับกับน้ำย้อมสีจากเปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจ๊ว และดอกอัญชัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อมสี 50% และ 70% ผสมสารช่วยติดสีในอัตราส่วนสารส้ม 0.05% และ Cu 0.5% ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที ที่อุณหภูมิ 70-80 °C โดยใช้อัตราส่วนน้ำย้อม 100 มิลลิลิตร ต่อเส้นไหม 2 กรัม ระยะเวลาในการย้อม 30 นาที จะได้ตัวอย่างเส้นไหมตามเงื่อนไขการย้อมทั้งหมด จำนวน 23 ตัวอย่าง

2. การศึกษาผลของการย้อมสีเส้นไหมจากสีย้อมธรรมชาติ ทำการส่อง scan สีย้อมเส้นไหมทั้งหมด แล้วนำมาวัดค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมสีไว้แล้ว ด้วยเครื่องวัดค่าสีใช้ mode RSEX แล้วสรุปค่าสี แล้วศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเส้นไหมระหว่างค่าสีที่ย้อมเมล็ดคำแสดครั้งที่ 1 กับค่าสีที่ย้อมโดยการย้อมทับ ดังนี้ (ระมัด ไซชัย และพรเพ็ญ ไซชัย, 2560)

$DL^* = L^*$ ที่ใช้ในการย้อมทับ $-L^*$ ที่ไม่ใช้ในการย้อมทับ

$\Delta a^* = a^*$ ที่ใช้ในการย้อมทับ $-a^*$ ที่ไม่ใช้ในการย้อมทับ

$\Delta b^* = b^*$ ที่ใช้ในการย้อมทับ $-b^*$ ที่ไม่ใช้ในการย้อมทับ

$DC^* = C^*$ ที่ใช้ในการย้อมทับ $-C^*$ ที่ไม่ใช้ในการย้อมทับ

$\Delta h = h$ ที่ใช้ในการย้อมทับ $-h$ ที่ไม่ใช้ในการย้อมทับ

3. ศึกษาความคงทนและการเปลี่ยนสีของสีย้อมเส้นไหม ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความคงทนของสีย้อมเส้นไหม

เบื้องต้น จำนวน 63 ตัวอย่าง โดยนำเส้นไหมที่ได้จากการย้อมสีจากเมล็ดคำแสดและการย้อมทับจากพืช 5 ชนิด คือ เปลือกประตู เปลือกยางนา แก่นฝาง เปลือกจ๊ว และดอกอัญชัน นำมาซักและนำไปตากแดด จากนั้นเลือกตัวอย่างของเส้นไหมที่ไม่ตกสีหรือตกสีน้อยที่สุด จำนวน 20 ตัวอย่าง เพื่อส่งไปวัดค่าสีและความคงทนในห้องปฏิบัติการเคมีต่อไป ดังนี้ (พัชรภรณ์ พิมพ์จันทร์, 2562)

3.1 ความคงทนต่อการซักฟอกที่อุณหภูมิ 40 °C และ 60 °C โดยวิธี ISO-105-C01: 1989

3.2 ความคงทนต่อแสง (แสงซินอนอาร์ก) โดยวิธี ISO-105-B02: 1994

3.3 การเปลี่ยนสีต่อการซักที่อุณหภูมิ 40°C และ 60 °C โดยวิธี ISO-105-C01: 1989 โดยกำหนดมาตรฐานความคงทนของสี แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคงทนและการเปลี่ยนสีของเส้นไหม

4. การศึกษาเปรียบเทียบสีการย้อมต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ (lab test) การย้อมสีในระดับต้นแบบ (prototype) เป็นการย้อมสีที่กระทำในแบบเดียวกันกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ แต่ทำการย้อมสีของเส้นไหมจำนวนมาก จากนั้นคัดเลือกตัวอย่างเส้นไหมที่ย้อมที่ดีที่สุด 3 ตัวอย่าง แล้วนำไปเป็นต้นแบบในการย้อมในระดับต้นแบบ และทำการเปรียบเทียบสีเส้นไหมที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลอง

กระบวนการเพิ่มจำนวนเจดสีย้อมธรรมชาติบนเส้นไหมจากเมล็ดคำแสด (Table 1)

วิธีที่ 1 ได้เจดสีใหม่จากสีธรรมชาติที่มีอยู่แล้วจำนวน 20 ตัวอย่าง ซึ่งสีที่ติดบนเส้นไหมไม่มีความคงทนของสีต่อการซักและแสง

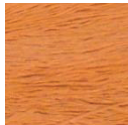
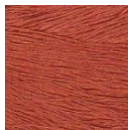
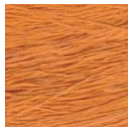
วิธีที่ 2 ได้เจดสีใหม่จากสีธรรมชาติที่มีอยู่แล้วจำนวน 20 ตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากกระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมจากเปลือกประตูผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมสารส้ม 0.05% สีของเส้นไหมเป็นสีน้ำตาลเข้ม กระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมจากเปลือกยางนาผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมสารส้ม 0.05% สีของเส้นไหมเป็นสีน้ำตาล กระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมจากเปลือกจ๊วผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมสารส้ม 0.05% สีของเส้นไหมเป็นสีน้ำตาล กระบวนการย้อมด้วยน้ำย้อมจากดอกอัญชันผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมสารส้ม 0.05% สีของเส้นไหมเป็นสีเทาเข้ม และกระบวนการย้อมสีที่ดีที่สุด คือ การย้อมด้วยน้ำย้อมจากแก่นฝางผสมกับสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อม

เมล็ดค้ำแสดงผสมกับสารส้ม 0.05% จะทำให้สีของเส้นไหมมีค่าสีแดงมากที่สุด

วิธีที่ 3 ได้เจดสีไหมจากสีธรรมชาติที่มีอยู่แล้วจำนวน 23 ตัวอย่าง โดยมีกระบวนการย้อมที่ดีที่สุด จำนวน

2 ตัวอย่าง คือ 1) การย้อมด้วยน้ำย้อมเมล็ดค้ำแสดงผสมกับสารส้ม 0.05% จะทำให้สีของเส้นไหมมีค่าความสว่างมากที่สุด 2) การย้อมด้วยน้ำย้อมเมล็ดค้ำแสดงผสมกับ Cu 0.5% จะทำให้สีของเส้นไหมมีค่าสีเหลืองมากที่สุด

Table 1 Shades of the silk thread from the process of increasing the number of natural dyes from the annatto tree seeds.

Sample Number	Dyeing process	Silk shades
1	Dye from the annatto tree seeds mixed with 0.5% Cu	
2	Dye from Fang wood mixed with 0.05% alum, followed by the annatto tree seeds dye mixed with 0.05% alum	
3	Dye from the annatto tree seeds mixed with 0.05% alum	

ผลการศึกษาค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดค้ำแสดง

ตัวอย่างที่ 2 จะมีค่าสีของเส้นไหมที่ได้มีความสว่าง (L*) มากที่สุด เท่ากับ 68.99 ± 0.01 ส่วนตัวอย่างที่ 1 จะมี

ค่าสีแดง-เขียว (a*) มากที่สุด เท่ากับ 27.73 ± 0.03 เป็นช่วงสีแดง และตัวอย่างที่ 3 จะมีค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b*) มากที่สุด เท่ากับ 43 ± 0.01 เป็นช่วงสีเหลือง (Table 2)

Table 2 The color values of the silk threads dyed with water staining from annatto tree seeds.

Sample Number	experimental process	Color value (\pm S.D.)				
		L*	a*	b*	C*	h
1	Dye from Fang wood mixed with 0.05% alum, followed by the annatto tree seeds dye mixed with 0.05% alum	46.83 ± 0.02	27.73 ± 0.03	17.39 ± 0.02	32.73 ± 0.03	32.09 ± 0.03
2	Dye from the annatto tree seeds mixed with 0.05% alum	68.99 ± 0.01	25.35 ± 0.01	42.12 ± 0.02	49.16 ± 0.01	58.59 ± 0.02
3	Dye from the annatto tree seeds mixed with 0.5% Cu	68.75 ± 0.00	25.56 ± 0.01	43.00 ± 0.01	50.02 ± 0.01	59.28 ± 0.01

ความคงทนของสีเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดค้ำแสดง

ตัวอย่างของเส้นไหมที่มีความคงทนดีที่สุด คือ เส้นไหมที่ย้อมด้วยเปลือกประคู้ผสมกับ Cu 0.5% ตามด้วยน้ำย้อมจากเมล็ดค้ำแสดงผสมกับ Cu 0.5% การย้อมด้วยวิธีนี้

จะทำให้ค่าความคงทนต่อการซักที่ 40°C อยู่ในระดับ 4-5 (ดี-ดีมาก) มีสีเปื้อนติดเส้นไหมอยู่ในระดับ 5 (ดีมาก) เส้นไหมจะติดเซลลูโลสอาซิเตตอยู่ในระดับ 5 (ดีมาก) และคุณภาพความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับ 4 (ดี) (Table 3)

Table 3 The color adhesion and fastness to washing and light of silk threads.

experimental process	Color fading washed at 40°C	paint staining on the material				
		wood	nylon	silk	cellulose acetate	color fastness to light
Padauk bark dye mixed with Cu 0.5 % followed by annatto tree seeds dye mixed with Cu 0.5 %.	4-5	5	5	5	5	4

เปรียบเทียบการย้อมสีในระดับต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ

เมื่อประเมินคุณสมบัติจากการติดสีและความคงทนสีของเส้นไหม โดยทำการคัดเลือกกรรมวิธีจากการย้อมสี 3 ตัวอย่าง คือ 1) น้ำย้อมเปลือกประดู่ผสมกับ Cu 0.5% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสม Cu 0.5% 2) น้ำย้อมเมล็ดคำแสด (70%) ผสมกับน้ำย้อมเปลือกประดู่ผสมกับสารส้ม 0.05% และ 3) น้ำย้อมเมล็ดคำแสด (50%) ผสมกับน้ำย้อมยางนาผสมกับ Cu 0.5% จากนั้นนำไปย้อมในระดับต้นแบบแล้วทำการเปรียบเทียบค่าสีของเส้นไหมที่ได้กับการย้อมในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่า L* a* b* C* และ h มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า ค่าสีที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบไม่แตกต่างจากการย้อมในห้องปฏิบัติการ (Figure 2)

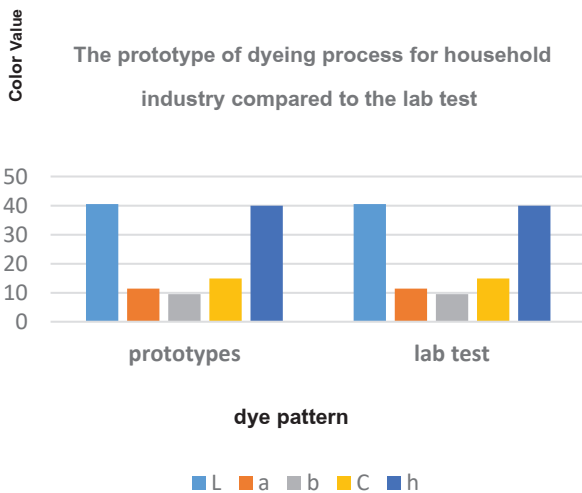


Figure 2 The prototype of dyeing process for household industry compared to the lab test

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1. กระบวนการที่ทำให้ค่าสีของเส้นไหมมีความคงทนดีที่สุดคือ เส้นไหมที่ย้อมด้วยเปลือกประดู่ผสมกับ Cu 0.5% ตามด้วยน้ำย้อมเมล็ดคำแสดผสมกับ Cu 0.5% การย้อมด้วยวิธีนี้จะทำให้ค่าสีมีความคงทนต่อแสงและการซักที่ 40 °C อยู่ในระดับดี-ดีมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของพัชราภรณ์

พิมพ์จันทร์ (2562) พบว่า เส้นใยจากกกที่ย้อมด้วยพืชธรรมชาติกับเมล็ดคำแสดสามารถเพิ่มความคงทนต่อแสงและการซักที่ 40 °C และการติดสีด้วยคอปเปอร์ซัลเฟตได้

2. ค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด พบว่า ตัวอย่างที่ 2 จะมีค่าสีของเส้นไหมที่ได้มีความสว่าง (L*) มากที่สุด เท่ากับ 68.99 ± 0.01 ส่วนตัวอย่างที่ 1 จะมีค่าสีแดง-เขียว (a*) มากที่สุด เท่ากับ 27.73 ± 0.03 เป็นช่วงสีแดง และตัวอย่างที่ 3 จะมีค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b*) มากที่สุด เท่ากับ 43 ± 0.01 เป็นช่วงสีเหลือง สอดคล้องกับงานวิจัยของปทิตตาท์ วงศ์แสงเทียน (2564) พบว่า ค่าสีของเส้นด้ายฝ้ายย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากขมิ้น มีความสว่างมากที่สุด (L*) อยู่ระหว่าง 45.73-67.64 ส่วนค่าสีแดง-เขียว (a*) อยู่ระหว่าง 22.79-0.82 เป็นช่วงสีแดง และค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b*) อยู่ระหว่าง 29.88-72.49 เป็นช่วงสีเหลือง

3. ความคงทนของสีเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด พบว่า ตัวอย่างของเส้นไหมที่มีความคงทนดีที่สุดคือ เส้นไหมที่ย้อมด้วยเปลือกประดู่ผสมกับ Cu 0.5% ตามด้วยน้ำย้อมจากเมล็ดคำแสดผสมกับ Cu 0.5% การย้อมด้วยวิธีนี้จะทำให้ค่าความคงทนต่อการซักที่ 40 °C อยู่ในระดับดีมาก และความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์ (2562) พบว่า ความคงทนของสีต่อแสงแดด (ISO 105-B02 : 1994) ของเส้นใยจากกกที่ย้อมด้วยสีย้อมธรรมชาติร่วมกับโพแทสเซียมอะลูมิเนียมซัลเฟตและการหมักโคลนอยู่ในระดับดี

4. การเปรียบเทียบค่าสีของการย้อมในระดับต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติ พบว่า ค่า L* a* b* C* และ h การมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า ค่าสีที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบไม่แตกต่างจากการย้อมในห้องปฏิบัติการ สอดคล้องกับงานวิจัยของพรเพ็ญ โชชัย ระมัด โชชัย และเมทินี ทวีผล (2551) พบว่า การย้อมสีระดับต้นแบบสีของต้นแบบทั้งหมดเหมือนกับการย้อมที่ทำการทดลองการย้อมในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป ควรมีการศึกษากระบวนการเพิ่มเจดสีย้อมจากธรรมชาติกับพืชชนิดอื่นๆ เพื่อที่จะได้เจดสีจากธรรมชาติที่หลากหลาย และศึกษากระบวนการที่ทำให้เจดสีย้อมจากธรรมชาติมีความคงทนต่อ

การชักและแสงให้มากขึ้น เพื่อสามารถเลือกและกำหนดสีได้จากสูตรการย้อมสี และควรมีการกำหนดรหัสของสีเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- คำพอง อยู่ศรี. (2551). การย้อมเส้นไหมที่เคลือบไคโตซานด้วยสีจากเมล็ดคำแสด. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- ปทิตตาทวี วงศ์แสงเทียน. (2564). การศึกษาผลของนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการเพิ่มเจดสีเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติจากขมิ้น. วารสารวิจัยและพัฒนาวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 16(1), 137-151.
- ปาเจรา พัฒนถานุตร. (2551). กระบวนการย้อมสีธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พัชรภรณ์ พิมพ์จันทร์. (2562). การเพิ่มการติดสีและความคงทนของสีย้อมธรรมชาติสำหรับเส้นใยจากกก. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- พรเพ็ญ โชชัย ระมัด โชชัย และเมทินี ทวีผล. (2551). การพัฒนาการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายจากสีย้อมธรรมชาติ: กรณีศึกษาการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายจากสีย้อมเปลือกมะพร้าวและเปลือกประตูของชุมชนในเขตตำบลนาบ่อคำ อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร. สักทอง: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.), 14(2), 26-45.

ระมัด โชชัย, พรเพ็ญ โชชัย. (2560). การศึกษาการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ในการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายจากสีย้อมธรรมชาติ. สักทอง: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.), 4(2), 59-70.

ศิริลักษณ์ วงศ์พิเชษฐ. (2556). ผลของการเสริมเมล็ดคำแสดในอาหารไก่ไข่ต่อคุณภาพไข่และสีไข่แดง. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

สุวิมล หงส์สาม, ทรงวุฒิ เอกวุฒิจวงศา, พิชัย สดภิบาล. (2557). ศึกษาและพัฒนากระบวนการเพิ่มจำนวนเจดสีย้อมธรรมชาติบนด้ายฝ้ายด้วยหอมเพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์สิ่งทอ. วารสารวิชาการ AJNU ศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 5(2), 71-84.

Silva G.F., Felix M.C., Gamarra A.L., Oliveira and F.A. Cabral. (2008). Extraction of Bixin from Annatto seeds using Supercritical carbon dioxide. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(2), 419-426.

โปรแกรมการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย

Job shop scheduling program with genetic algorithm from multi-objective function construction based on sand pile theory

อิทธิศักดิ์ ศรีดำ^{1*}

Idhisak Sridam^{1*}

Received: 26 January 2021 ; Revised: 19 October 2021 ; Accepted: 10 January 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอโปรแกรมการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย ผลการวิจัย พบว่า สมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงของวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายจะมีอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงที่ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำรุ่นที่ 2 จึงเหมาะต่อการค้นหาแบบแผนการจัดตารางการผลิตใหม่ให้เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะของการผลิตแบบตามงานที่มีหลายปัจจัย ส่วนผลการทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งาน พบว่า การยอมรับการใช้เทคโนโลยีด้านภาพรวมของโปรแกรม การยอมรับการใช้เทคโนโลยีด้านการดำเนินงานตามขั้นตอนของโปรแกรม การยอมรับการใช้เทคโนโลยีด้านการออกแบบโปรแกรม ซึ่งทั้ง 3 ด้าน มีความเหมาะสมมาก ส่วนการยอมรับการใช้เทคโนโลยีด้านลักษณะทั่วไปมีความเหมาะสมมากที่สุด

คำสำคัญ: โปรแกรมการจัดลำดับงานผลิต วิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์

Abstract

This article aims to present a job shop scheduling program with a genetic algorithm for multi-objective function construction based on sand pile theory. The results revealed that the convergence performance of the genetic algorithm from the multi-objective function construction based on sand pile theory was higher than non-dominated sorting genetic algorithm II. Therefore, it is suitable to find the optimal re-scheduling scheme under multi-factory job shop scheduling conditions. The results of testing the technology acceptance revealed that the acceptance of program overview, the acceptance of program steps execution and the acceptance of program design were very appropriate. The acceptance of general characteristics was most appropriate.

Keywords: Job shop scheduling program, sand pile multi-objective genetic algorithm, multi-objective function

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์และระบบสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

¹ Department of Software Engineering and Information System, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand 10330

* Corresponding author, E-mail: idhisak@pit.ac.th

บทนำ

ระบบการจัดลำดับงานการผลิต (Production Shop Scheduling System: PSSs) ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดให้เป็นองค์ประกอบ (Component) หรือโมดูล (Module) ของระบบวางแผนทรัพยากรทางธุรกิจขององค์กรโดยรวม (Enterprise Resource Planning System: ERPs) ซึ่ง ERPs เป็นเครื่องมือที่นำมาใช้ในการบริหารธุรกิจเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในธุรกิจ สำหรับช่วยวางแผนการลงทุนและบริหารทรัพยากรของธุรกิจโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ERPs ช่วยเชื่อมโยงระบบงานต่างๆ ระหว่างการจัดซื้อจัดจ้าง วัสดุคงคลัง การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ การผลิต การตลาด การขาย และบัญชีการเงิน ทำให้สามารถบริหารองค์รวมเพื่อให้เกิดผลประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตาม การทำงานของ ERPs จะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อการผลิตอยู่ในสภาวะการผลิตแบบต่อเนื่องหรือการจัดลำดับงานการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Job Scheduling) ซึ่งปัจจุบันความต้องการของลูกค้ามีความหลากหลายในคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ (Product Qualification Diversity) และเป็นความต้องการงานผลิตแบบพลวัต (Dynamic Job Order) เมื่อมีความต้องการงานผลิตแบบพลวัตเข้ามาในระหว่างการผลิตแบบต่อเนื่องทำให้ต้องดำเนินการจัดลำดับงานการผลิตใหม่ ซึ่ง PSSs ที่เป็นส่วนหนึ่งของ ERPs ในปัจจุบันยังไม่สามารถรองรับการจัดลำดับงานผลิตใหม่ได้อย่างอัตโนมัติและเหมาะสมได้ ดังนั้น เมื่อมีความต้องการงานผลิตแบบพลวัตมาถึงจึงต้องอาศัยทักษะ ความชำนาญ และประสบการณ์การทำงานของผู้บริหารงานผลิตในการดำเนินการจัดลำดับงานผลิตใหม่ (Bhongade, & Khodke, 2012)

สำหรับการแก้ไขปัญหาหรือการหาคำตอบ การจัดลำดับงานผลิตให้เหมาะสมได้ด้วยการแก้ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน (Job Shop Scheduling Problem: JSP) โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การพัฒนาขั้นตอนการจัดลำดับงานด้วยวิธีหาคำตอบแบบการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search Algorithm) สำหรับการแก้ปัญหการจัดลำดับงานผลิตด้วยการใช้ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ด้วยค่าของช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าเวลานสิ้นสุดงานสุดท้ายน้อยที่สุด หรือเรียกอีกอย่างว่า “เมคสเปน” (Makespan) โดยการเรียงลำดับของงาน การผลิตที่มีผลต่อเวลาดังเครื่องจักร (Setup Time) โดยสามารถลดเวลาในการค้นหาคำตอบได้ (Sotkov *et al.*, 2020) การใช้วิธีแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยการย้าย (Shift Bottleneck Procedure) เป็นวิธีไฮบริด (Hybrid) ที่ใช้การค้นหาคำตอบแบบท้องถิ่น (Local Search Approach) ร่วมกับการค้นหาคำตอบย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable Neighborhood Search) (Kalshetty *et al.*, 2020) การวางแผนการผลิตแบบไหลลื่น (Flow Shop Scheduling Problem: FSP) ด้วยการ

เพิ่มข้อจำกัดของงานก่อนหน้า (Precedence Constraint) และจึงแก้ไขด้วยวิธีของ จอห์นสัน (Johnson's Rule) ซึ่งจะเหมาะสมในการหาคำตอบสำหรับเครื่องจักร 2 เครื่อง นอกจากนี้ ยังสามารถขยายผลไปใช้กับปัญหาที่มีจำนวนเครื่องจักร 3 และ 4 เครื่องได้ (Gupta & Chauhan, 2015) การพิจารณาใส่ความแปรปรวนในปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน เพื่อสร้างปัญหาใหม่แล้วแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยการใช้เทคนิคการจัดตารางการผลิตแบบไปข้างหน้า (Forward Scheduling Approach) เปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตแบบไปข้างหลัง (Backward Scheduling Approach) โดยมีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ การลดความแปรปรวนของเมคสเปน ผลการทดลอง พบว่า การจัดตารางการผลิตแบบไปข้างหน้า มีประสิทธิภาพสูงกว่า (Sonmez & Uysal, 2015) การใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) ในการแก้ไขปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงานโดยใช้วิธีฮิวริสติก 2 วิธี โดยมีสมมติฐานว่าแต่ละงานต้องผ่านการผลิตอย่างน้อย 2 เครื่องจักร และต้องมี 1 ขั้นตอน ที่ผลิตในเครื่องจักรที่เป็นคอขวดของระบบ ผลการทดลอง พบว่า กรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) จะแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยอัตราส่วนเท่ากับสามส่วนสองของประสิทธิภาพ (Performance Ratio) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาในการวางแผนการผลิตแบบไหลลื่นแบบเครื่องจักรที่เหมือนกันในแต่ละขั้นตอนมากกว่า 1 เครื่อง (Flow shop scheduling problem with parallel machines) (Al-Salem *et al.*, 2016) การแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยวิธีฮิวริสติก (Dispatching Heuristic Rule) สำหรับใช้ในการแก้ปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงานและการวางแผนการผลิตแบบไหลลื่นด้วยการเปรียบเทียบคิสมัทซ์ฮิวริสติก โดยการจัดตารางการผลิตจะเปลี่ยนจากการวางแผนการผลิตแบบไหลลื่นไปเป็นการจัดตารางการผลิตแบบตามงาน และใช้การจำลองสถานการณ์ (Simulation Study) ด้วยการสุ่มเส้นทางงาน (Job Routing) ให้แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษา พบว่า สามารถนำวิธีการแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยวิธีฮิวริสติกไปใช้งานจริงได้ (Turkyilmaz *et al.*, 2020) การแก้ไขปัญหาคอขวดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เพื่อค้นหาแบบแผน (Pattern) ในการแก้ไขปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงานประกอบด้วย ขั้นตอนดำเนินงาน 2 ขั้นตอน ได้แก่ การค้นหาเมคสเปนสุดท้ายที่สั้นที่สุดในการสร้างชุดคำตอบที่ดีที่สุด และ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และพยากรณ์ว่าถ้างานในลำดับก่อนหน้าคืองานใดแล้วงานถัดไปควรเป็นงานใด (Wang *et al.*, 2015) และการใช้เทคนิควิธีการลอกแบบ (Memetic Algorithm) เป็นการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมประยุกต์ร่วมกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่ซึ่งในส่วนประกอบของโครโมโซม (Chromosome) จะถูกเรียกว่า “มีม (Meme)” แทนคำว่า “ยีน (Gene)” โดยเน้น

ที่ช่วงเวลาระหว่างการเปลี่ยนกิจกรรมการผลิต (Time Lag) กล่าวคือ ผลต่างของเวลาที่ต่ำสุดและสูงสุดของเวลาเริ่มต้นการทำงานของทุกกิจกรรม (Raeesi & Kobt, 2012)

นอกจากการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วยวิธีฮิวริสติกแล้ว การแก้ปัญหาด้วยวิธีเมตา-ฮิวริสติก (Meta-heuristic) (Pongchairerks, 2019) และการแก้ปัญหาด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) (Calis & Bulkan, 2015) การประยุกต์ด้วยวิธีการผสมระหว่างวิธีเมตา-ฮิวริสติก 2 วิธีการมาใช้ในการแก้ไขปัญหการจัดตารางการผลิตแบบตามงานด้วย (Pongchairerks, 2019) รวมถึงการประยุกต์วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเคออสมีมิติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objective Chaos Memetic Algorithms: MOCMA) (Schutze *et al.*, 2015) อาจนำมาใช้แก้ปัญหาการผลิตแบบตามงานที่มีหลายปัจจัย (Multi Factors) ในการพิจารณาการจัดลำดับการผลิตได้ เนื่องจาก MOCMA มีการปรับปรุงวิธีการลอกแบบด้วยการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objective) เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหในการปรับปรุงประชากรคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

ปัญหาที่แท้จริงของการค้นหาแบบแผนการจัดตารางการผลิตใหม่ให้เหมาะสมไม่ใช่ปัญหาของส่วนงานขาย (Sale Problem) เนื่องด้วยส่วนงานขายเป็นผู้รับความต้องการของลูกค้าโดยตรง ซึ่งการถูกแทรกงานผลิตจากความต้องการใหม่ของลูกค้า (New Order) หลังจากแผนการผลิตเดิมได้ถูกส่งผลิตไปแล้วและอยู่ระหว่างการผลิตเป็นปัญหาที่สร้างผลกระทบต่อระบบการผลิตในองค์กรรวมเป็นอย่างมาก เช่น ต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น (Over Cost) การหยุดการผลิตเพื่อจัดเตรียมการผลิตใหม่ (Production Hold) ความเครียดสะสมของทีมงานผลิตเนื่องจากถูกแทรกงานปกติ (Unhappy Employee) การเกิดการทำงานนอกเวลา (Over Time) การถูกดำเนินจากลูกค้ากรณีที่ไม่สามารถส่งมอบได้ตามกำหนดเนื่องจากถูกแทรกงานผลิตใหม่ (Customer Complaint) เป็นต้น ดังนั้น การทราบถึงแผนการจัดตารางการผลิตใหม่ทันทีในกรณีที่มีการถูกแทรกงานผลิตจากความต้องการใหม่ของลูกค้าหลังจากแผนการผลิตเดิมได้ถูกส่งผลิตไปแล้วและอยู่ระหว่างการผลิตจึงเป็นสารสนเทศที่สำคัญสำหรับส่วนงานขายสำหรับใช้อ้างอิงในการเจรจาต่อรองนัดหมายการส่งมอบผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมและเกิดผลกระทบต่อการผลิตน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำเสนอการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย โดยการพัฒนาโปรแกรมการ

จัดลำดับงานผลิตใหม่อย่างอัตโนมัติและเหมาะสมเมื่อความต้องการงานผลิตแบบพลวัตมาถึงด้วยการเปลี่ยนตารางการผลิตเดิมระหว่างการผลิตเป็นตารางการผลิตแบบตามงาน (Job Shop Scheduling) ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย (Sand Pile Multi Objective) ในการค้นหาแบบแผนการจัดตารางการผลิตใหม่ให้เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะของการผลิตแบบตามงานที่มีหลายปัจจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือวิจัย

1. เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย (Genetic Algorithm with Sand Pile Multi Objective: GASPM)
2. ชุดปัญหา DTLZ (Suite of Continuous Test Problems by Deb, Thiele, Laumanns, Zitzler)
3. โปรแกรมเสริมสำหรับประมวลผลข้อมูลแบบ GASPM
4. ระบบ ERP (SYSPRO ERP)
5. แบบประเมินการยอมรับการใช้เทคโนโลยี

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากร ได้แก่ ผู้ใช้งานส่วนงานขายและผู้ใช้งานในส่วนงานผลิตในอุตสาหกรรมผลิตหมึกพิมพ์
2. กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ผู้ใช้งานส่วนงานขาย จำนวน 5 คน และผู้ใช้งานในส่วนงานผลิต จำนวน 5 คน

ขั้นตอนวิจัย

การวิจัยนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนวิจัย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การพัฒนาวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย การทดสอบสมรรถนะของคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย การพัฒนาโปรแกรมเสริมสำหรับประมวลผลข้อมูล และการทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งาน

1. การพัฒนาวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายเป็นการใช้กระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิมร่วมกับการพัฒนาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย ซึ่งประยุกต์ร่วมกันวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิมที่มีอยู่แล้วกับฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์เป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์จะประกอบด้วยจำนวน m วัตถุประสงค์และตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) มากกว่า 1 ตัวแปร ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Maximize(or minimize)} : \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (1)$$

โดยที่ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ
 $f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ,
 $i = 1, 2, \dots, m$

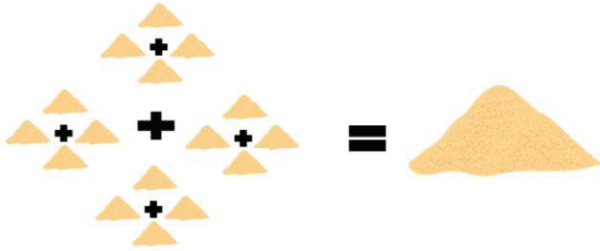


Figure 1 Sand Pile Theory

สำหรับการนำแนวคิดการก่อกองทรายมาประยุกต์ใช้พบว่า Fernandes *et al.* (2013) ได้นำแนวคิดนี้ไปใช้เกี่ยวกับวิธีเชิงพันธุกรรมในส่วนของ การการกลายพันธุ์ (Sandpile Mutation Operator) สำหรับบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดการก่อกองทรายในการกำหนดฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ซึ่งเกิดจากแนวคิดการรวมกันของการก่อกองทรายจำนวนหลายๆกองและนำมารวมกันจะได้กองทราย 1 กอง ไม่ว่าจะมียังจำนวนกองทรายจำนวนมากเท่าไรเมื่อนำมารวมกันแล้วจะได้

กองทราย 1 กองทรายเสมอ ซึ่งสามารถแสดงแนวคิดการก่อกองทรายได้ดัง Figure 1 จากแนวคิดนี้จะต้องแปลงค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f_i(x)$ ให้อยู่ในรูปสัดส่วนตัวเลขโดยค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่งและค่าต่ำสุดเท่ากับศูนย์และนำมารวมกันตามกฎคณิตศาสตร์การรวมกันของสัดส่วน (Proportion Combination Rule: $p(f_i(x))$) ทำให้ได้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (2)

$$\text{Maximize(or minimize)} : \{p(f_i(x)) * \dots * p(f_m(x))\} \quad (2)$$

โดยที่ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ
 $p(f_i(x))$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ,
 $i = 1, 2, \dots, m$

จากสมการที่ (2) ทำให้ลดภาระการประมวลผลของวิธีเชิงพันธุกรรมได้ ซึ่งการพิจารณาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะใช้ค่าตัวเลขระหว่าง 0-1 เท่านั้น และสามารถเพิ่มฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างไม่จำกัด ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการผลิตที่มีตัวแปรตัดสินใจหลายตัวแปร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท ซึ่งวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายสามารถแสดงได้ดัง Figure 2

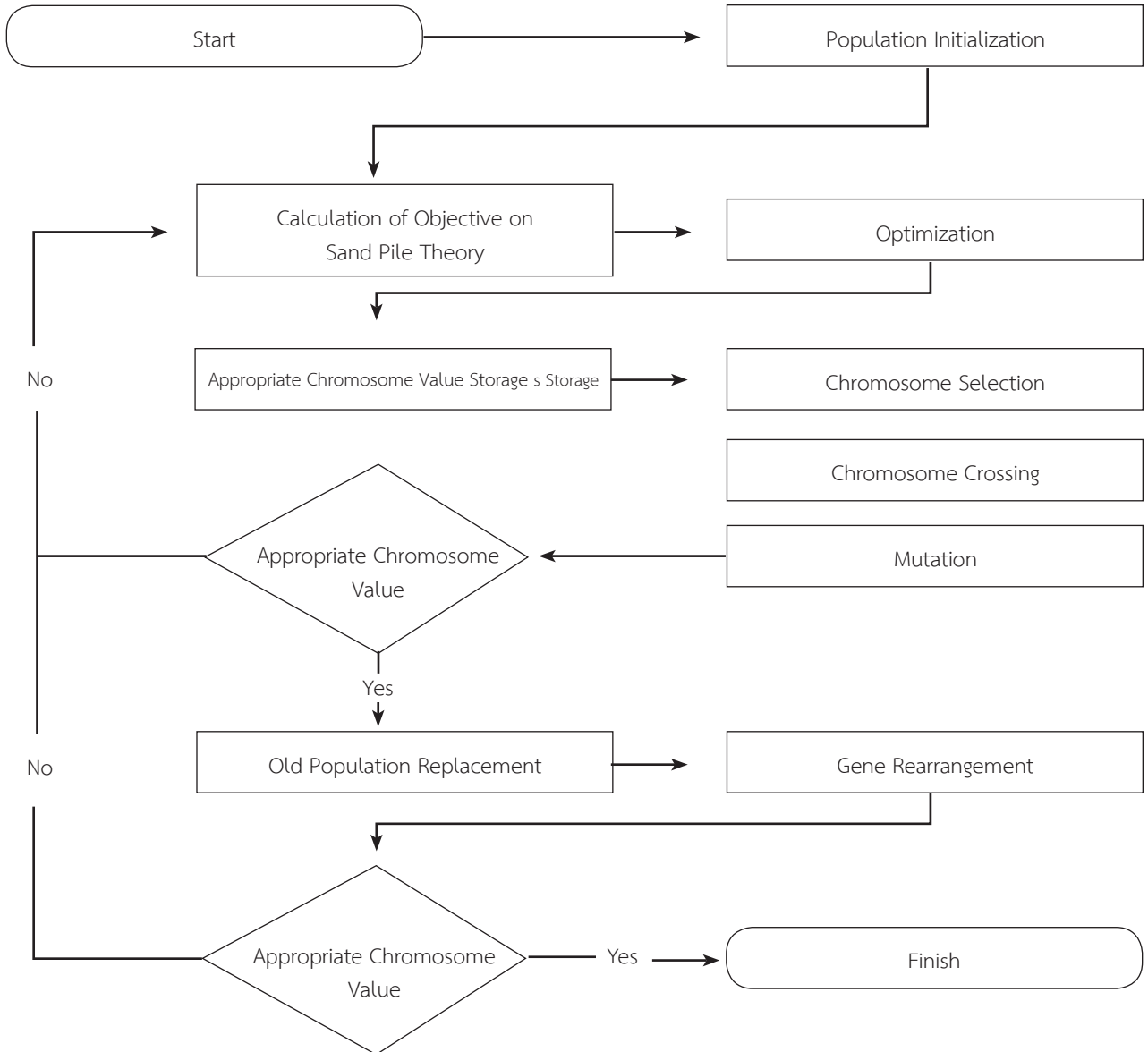


Figure 2 Sand Pile Multi-Objective Genetic Algorithm

จาก Figure 2 วิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายจะมีขั้นตอนการคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายเพิ่มขึ้นมาจากขั้นตอนปกติของวิธีเชิงพันธุกรรมโดยวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) การสร้างประชากรเริ่มต้น
- 2) การคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย
- 3) การหาค่าความเหมาะสม
- 4) การเก็บค่าโครโมโซมที่เหมาะสม
- 5) การคัดเลือกโครโมโซม

- 6) การข้ามสายพันธุ์โครโมโซม
- 7) การกลายพันธุ์
- 8) การทำซ้ำส่วนคัดเลือกโครโมโซม
- 9) การแทนที่ประชากรรุ่นเก่า
- 10) การจัดเรียงยีนใหม่
- 11) การทำซ้ำเพื่อหาค่าโครโมโซมที่เหมาะสม

2. การทดสอบสมรรถนะของคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ด้วยการเปรียบเทียบสมรรถนะของคำตอบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำรุ่นที่ 2 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGAI) (Kashyap *et al.*, 2020) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่ง

ที่เป็นที่นิยมวัดสมรรถนะของคำตอบค่าความเหมาะสม จากฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบ ได้แก่ สมรรถนะของคำตอบสำหรับการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measurement) ดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) และสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบ (Spread Measurement) ดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$Convergence = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} dt_i}{|A^*|} \tag{3}$$

$$dt_i = \min_{j=1}^{|A^*|} \sqrt{\sum_{k=1}^k \left[\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right]^2} \tag{4}$$

$$Spread(A) = \frac{sd_f + sd_l + \sum_{i=1}^{|A|} \|sd_i - \bar{sd}\|}{sd_f + sd_l + (|A| - 1)sd} \tag{5}$$

$$sd_i = \sqrt{\sum_{k=1}^k \left[\frac{f_k(x) - f_k(x_{i+1})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right]^2} \tag{6}$$

จากสมการที่ (3) และ (4) A^* คือ เซตของคำตอบที่แท้จริง ส่วน dt_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ $|A^*|$ คือ จำนวนคำตอบที่แท้จริง ในเซต A และถ้าสมรรถนะของคำตอบสำหรับการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดถือว่ามีสมรรถนะสูงที่สุด จากสมการที่ (5) และ (6) และเป็นระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน ส่วนเป็นระยะของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ สำหรับ sd_i คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง และ $|A|$ คือ จำนวนคำตอบที่หาได้ ส่วน dt_i คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ไม่ถูกรอบง่า

3. การพัฒนาโปรแกรมเสริมสำหรับประมวลผลข้อมูลแบบ GASPM ประกอบด้วย 2 โปรแกรมหลัก ได้แก่ โปรแกรมประมวลผลวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย และโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) โปรแกรมประมวลผลวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิด การก่อกองทราย เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยชุดการพัฒนาโปรแกรม MATLAB & Simulink และแปลงไฟล์โปรแกรมให้อยู่ในรูปแบบสกุลไฟล์ .ini โดยกำหนดชื่อไฟล์ว่า "gaspm.ini" สำหรับใช้ในการจัดลำดับความเหมาะสมของตารางการผลิตสำหรับตัวแปรตัดสินใจซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้จากตัวเลือกในโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงาน สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 2 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาที่กำหนดส่งของงานผลิต (Due Date) และต้นทุนของงานผลิต (Production Cost) โดยผลลัพธ์ของรายการการผลิตที่เหมาะสมของตารางการผลิตจะถูกเก็บในตัวแปรชนิดเมทริกซ์ (Matrix) โดยหลักสดมภ์ (Column) คือ รหัสข้อมูล ได้แก่ สถานีงาน/ เครื่องจักร, ใบบาง, งาน (วัตถุดิบ (Raw Material)/ ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Semi Product) / ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Product), จำนวนที่ผลิตในสถานีงาน และเวลาที่ใช้ในการผลิต ส่วนหลักแถว (Row) คือ ลำดับงานผลิต แสดงตัวอย่างข้อมูลดัง Figure 3 โดยยกตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลตัวอย่างในหลักสดมภ์ที่ 1 ในแถวที่ 1 ได้แก่ P001 คือ รหัสลำดับงานที่ 1 W01 คือ รหัสสถานีงาน O190823001 คือ ใบบาง SM101 คือ รหัสงาน ส่วน 100 คือจำนวนผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตในสถานีงาน และ 12 คือเวลาที่ใช้ในการผลิตมีหน่วยเป็นนาที ซึ่งข้อมูลถูกนำไปใช้ในโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานในลำดับต่อไป โดยมีฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (7-11)

P001	W01,0190823001,SM101,100,12	W02,0190823001,SM101,100,30
P002	W01,0190823002,SM109,250,15	W02,0190823002,SM101,250,25
P003	W01,0190823003,SM101,400,92	W02,0190823003,SM101,400,70

Figure 3 Output of the Production Line

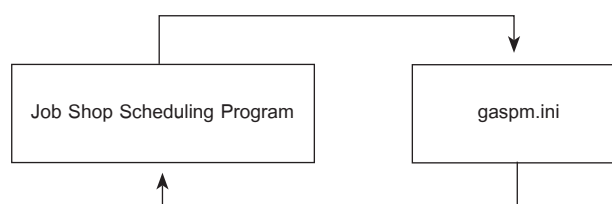


Figure 4 Relationship within Program

$$\text{Maximize} : \{p(f_1(x)) * p(f_2(x))\} \tag{7}$$

$$p(f_1(x)) = \text{Maximize}(pdt_i / pdt_A) \tag{8}$$

$$p(f_2(x)) = \text{Maximize}(1 - (pdc_{min})) \tag{9}$$

$$pdt_i = dvt_i - pdt_i \tag{10}$$

$$pdt_A = dvt_i - pdt_b \tag{11}$$

โดยที่ pdt_i คือ ระยะเวลาที่กำหนดส่งของงานผลิตที่ i
 pdt_A คือ ระยะเวลาที่กำหนดส่งของงานผลิตทุกงาน
 dvt_i คือ เวลาที่กำหนดส่งมอบงานที่ i
 pdt_i คือ เวลาเริ่มของงานผลิตที่ i
 dvt_i คือ เวลาที่กำหนดส่งมอบงานช้าที่สุด
 pdt_b คือ เวลาที่กำหนดส่งของงานผลิตที่เริ่มต้นเร็วที่สุด
 pdc_{min} คือ ต้นทุนของงานผลิต i ที่น้อยที่สุด
 $f_1(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ ค่าตัวแปรตัดสินใจด้านระยะเวลาที่กำหนดส่งของงานผลิต

(x) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ค่าตัวแปรตัดสินใจด้านต้นทุนของงานผลิต

2) โปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยชุดการพัฒนาโปรแกรม Visual Basic dot net (VB.net) สำหรับใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยมีความสัมพันธ์แสดงดัง Figure 4 โปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานจะส่งค่าตัวแปรตัดสินใจ ได้แก่ ระยะเวลาผลิตสูงสุดในแต่ละสถานีนงานผลิต ต้นทุนการตั้งเครื่องจักรในแต่ละสถานีนงานกรณีเริ่มการผลิตใหม่ และต้นทุนการผลิตที่ใช้ในแต่ละสถานีนงานผลิต

แผนกำหนดการดำเนินงานขาย						
ความต้องการ				แผนกำหนดการ		
รหัสลูกค้า	รหัสคำสั่งซื้อ	รหัสสินค้า	จำนวน	หน่วย	วันที่สั่งซื้อ	วันที่ส่งมอบ
A-2000-00018	SO201911-000037	GPV100-OL	200	กระป๋อง	21/11/2019	24/11/2019
A-2000-00018	SO201911-000037	GPV100-OS	80	กระป๋อง	21/11/2019	24/11/2019
A-2000-00018	SO201911-000037	NPV990-XL	90	ถัง	21/11/2019	25/11/2019
A-2000-00018	SO201911-000038	GPV100-OM	980	กระป๋อง	22/11/2019	24/11/2019
A-2000-00021	SO201911-000039	GPV100-OL	50	กระป๋อง	21/11/2019	24/11/2019
A-2000-00033	SO201911-000040	GPV100-OS	20	กระป๋อง	21/11/2019	24/11/2019
A-2000-00047	SO201911-000041	GPV100-OS	50	กระป๋อง	21/11/2019	25/11/2019
A-2000-00055	SO201911-000042	GPV100-OM	1,000	กระป๋อง	22/11/2019	24/11/2019

(A) Sales Schedule Processing Screen

แผนกำหนดการดำเนินงานผลิต										
การประมวลผล		สถานะ		ดำเนินการผลิต						
ฟังก์ชัน	สถานะคำสั่งซื้อ	สถานะคำสั่งซื้อ	สถานะคำสั่งซื้อ	ประมวลผล	ดำเนินการผลิต					
ลำดับ	สถานีนงาน	รหัสงานผลิต	รหัสสินค้า	จำนวน/หน่วย	ก่อนหน้า	วันที่เริ่มผลิต	เวลาเริ่ม	วันที่เสร็จ	เวลาเสร็จ	
1	W01	O190823001	SM101	1,000 กก.	-	24/11/2019	9:31	24/11/2019	10:00	
2	W02	O190823001	SM501	1,000 กก.	W01	24/11/2019	10:01	24/11/2019	10:30	
3	W05	O190823001	SM908	1,000 กก.	W02	24/11/2019	10:31	24/11/2019	11:00	
4	W09	O190823001	GPV100	30,000 กก.	W05	24/11/2019	11:01	24/11/2019	12:00	
5	W18	O190823001	GPV100-OS	150 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	13:45	
6	W20	O190823001	GPV100-OM	396 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	14:15	
7	W21	O190823001	GPV100-OM	396 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	14:15	
8	W22	O190823001	GPV100-OM	396 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	14:15	
9	W23	O190823001	GPV100-OM	396 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	14:15	
10	W24	O190823001	GPV100-OM	396 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	14:15	
11	W26	O190823001	GPV100-OL	250 กระป๋อง	W09	24/11/2019	13:30	24/11/2019	13:55	

(B) Production Schedule Plan Processing Screen

Figure 5 GASPM Data Processing Add-on

ผลลัพธ์ของรายการการผลิตที่เหมาะสมของตารางการผลิตจะถูกเก็บในตัวแปรชนิดเมทริกซ์ (Matrix) ได้แก่ สถานีนงาน โบงาน รหัสงาน (วัตถุดิบ (Raw Material)/ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Semi Product)/ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Product)) จำนวนที่ผลิตในสถานีนงาน และเวลาที่ใช้ในการผลิต ไปประมวลผลการจัดลำดับความเหมาะสมของตารางการผลิตที่ไฟล์ "gaspm.ini" ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะนำมาจากระบบ SYSPRO ERP และไฟล์ "gaspm.ini" ส่งค่ากลับมาให้โปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานในรูปแบบข้อมูลตัวแปรชนิดเมทริกซ์แสดงตัวอย่างข้อมูลดัง Figure 3 หลังจากนั้นโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานจะทำการแสดงผลให้ผู้ใช้งานต่อไป แสดงตัวอย่างโปรแกรม ดัง Figure 5

4. การทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานได้ใช้แบบประเมินการยอมรับการใช้เทคโนโลยีที่ได้รับการตรวจสอบค่าดัชนีความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity Index: CVI) จากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน เท่ากับ 0.88 ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้ทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งาน (Vakili & Jahangiri, 2018) การทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานนั้นจะประเมินความเหมาะสมจากความสะดวกและความง่ายในการใช้งาน ได้แก่ การดำเนินตามขั้นตอนของโปรแกรม การออกแบบโปรแกรมลักษณะทั่วไป และภาพรวมของโปรแกรม ซึ่งการประเมินความเหมาะสมของโปรแกรมใช้มาตราส่วนประเมินค่า 5 ระดับ โดยนำผลประเมินรายข้อมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และเทียบกับเกณฑ์การประเมิน (Johnson & Christensen, 2014) ดังนี้

ความเหมาะสมมากที่สุด คะแนนเท่ากับ 5
 ความเหมาะสมมาก คะแนนเท่ากับ 4
 ความเหมาะสมปานกลาง คะแนนเท่ากับ 3
 ความเหมาะสมน้อย คะแนนเท่ากับ 2
 ความเหมาะสมน้อยที่สุด คะแนนเท่ากับ 1
 เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ย มีดังนี้
 ค่าเฉลี่ย 4.51-5.00 เท่ากับ เหมาะสมมากที่สุด
 ค่าเฉลี่ย 3.51-4.50 เท่ากับ เหมาะสมมาก
 ค่าเฉลี่ย 2.51-3.50 เท่ากับ เหมาะสมปานกลาง
 ค่าเฉลี่ย 1.51-2.50 เท่ากับ เหมาะสมน้อย
 ค่าเฉลี่ย 1.00-1.50 เท่ากับ เหมาะสมน้อยที่สุด

ผลการวิจัย

การทดสอบสมรรถนะของคำตอบที่ได้จากวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ ตามแนวคิดการก่อกองทรายที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ด้วยการเปรียบเทียบสมรรถนะของคำตอบ NSGAI โดยชุดของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ คือ ชุดปัญหา DTLZ โดยใช้ DTLZ1-4 แบบ 2 วัตถุประสงค์ โดยมีรายละเอียดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดัง Table 1 และมีรายละเอียดในการทดลองวิธีเชิงพันธุกรรม ดังนี้

Fitness ใช้วิธี Pareto Ranking Approach

Selection ใช้วิธี Tournament Selection

Crossover ใช้วิธี Modified Order Crossover

Mutation ใช้วิธี Gaussian Mutation

Table 1 Multi-Objective Description

DTLZ	Objective function
	$f_1 = \frac{1}{2} x_1(1 + g)$ $f_2 = \frac{1}{2} x_2(1 - x_1)(1 + g)$
1	$g = 100 \left[5 + \sum_{i=2}^6 ((x_i - 0.5)^2 - \cos(20\pi(x_i - 0.5))) \right]$ $x_i \in [0,1], i \in \{1, \dots, 6\}$
	$f_1 = (1 + g) \cos \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$ $f_2 = (1 + g) \sin \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$
2	$g = \sum_{i=2}^1 (x_i - 0.5)^2$ $x_i \in [0,1], i \in \{1, \dots, 11\}$

Table 1 Multi-Objective Description (continue)

DTLZ	Objective function
	$f_1 = (1 + g) \cos \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$ $f_2 = (1 + g) \sin \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$
3	$g = 100 \left[10 + \sum_{i=2}^6 ((x_i - 0.5)^2 - \cos(20\pi(x_i - 0.5))) \right]$ $x_i \in [0,1], i \in \{1, \dots, 11\}$
	$f_1 = (1 + g) \cos \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$ $f_2 = (1 + g) \sin \left(x_1 \frac{\pi}{2} \right)$
4	$g = \sum_{i=2}^1 (x_i - 0.5)^2$ $\alpha = 100$ $x_i \in [0,1], i \in \{1, \dots, 11\}$

ผลของการทดสอบสมรรถนะของคำตอบที่ได้จากวิธี GASPM เปรียบเทียบสมรรถนะของคำตอบวิธี NSGAI พบว่า สมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงของวิธี GASPM จะมีอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงที่ดีกว่าวิธี NSGAI และสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบของวิธี GASPM มีการกระจายที่สม่ำเสมอและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าวิธี NSGAI แสดงดัง Table 2

Table 2 The Results of Answer Performance

DTLZ/ Algorithm	Performance				
	Convergence		Spread		
	Mean	Variance	Mean	Variance	
1	GASPM	0.0011	0.00092	0.1089	0.09674
	NSGAI	0.0025	0.00145	0.6914	0.00145
2	GASPM	0.0007	0.00027	0.0178	0.00574
	NSGAI	0.0017	0.00090	0.5428	0.50476
3	GASPM	0.0012	0.00020	0.0440	0.01286
	NSGAI	0.0018	0.00072	0.3377	0.43764
4	GASPM	0.0014	0.00102	0.1101	0.04978
	NSGAI	0.0041	0.00130	0.6958	0.38014

Table 3 Testing of Answer Performance with Appropriate Production Functions

DTLZ/ Algorithm	Performance				
	Convergence		Spread		
	Mean	Variance	Mean	Variance	
1*	GASPM	0.001463	0.00102	0.0789	0.09679
	NSGAI	0.003325	0.00155	0.6614	0.00150
2**	GASPM	0.001862	0.00112	0.0801	0.04983
	NSGAI	0.005453	0.00140	0.6658	0.38019

* Answer performance from customer's former requirement,

** Answer performance from customer's new requirement

Table 4 Testing of Technology Acceptance

Items	Mean	SD	Suitability Level
1. Program Steps Execution			
1.1 Program Objectives	4.47	0.72	High
1.2 Consistency of the Objectives with the program	4.29	0.77	High
1.3 Easy to Use	4.06	0.43	High
1.4 Timely Processing	4.59	0.51	Highest
Mean	4.35	0.61	High
2. Program Design			
2.1 Font			
2.1.1 Size	4.53	0.51	Highest
2.1.2 Style	4.71	0.47	Highest
2.1.3 Theme	4.24	0.44	High
2.1.4 Color	4.35	0.93	High

Table 4 Testing of Technology Acceptance (contunue)

Items	Mean	SD	Suitability Level
2.2 Descriptive Image	4.53	0.62	Highest
2.3 Clear Color of Font, Number and Image	4.41	0.51	High
Total	4.46	0.58	High
3. General Characteristics			
3.1 Easy and Convenient	4.75	0.29	Highest
3.2 Suitability for Use	4.75	0.29	Highest
3.3 Relationship of the Illustration with the Content	4.75	0.29	Highest
Total	4.75	0.29	Highest
4. Program Overview			
4.1 Procedure	4.47	0.59	High
4.2 Easy to Understand Language	4.47	0.59	High
4.3 Clear Illustrations	4.47	0.59	High
4.4 Appropriate Illustrations	4.47	0.59	High
Total	4.47	0.59	High

ผลการทดสอบสมรรถนะของคำตอบด้วยฟังก์ชันการผลิตที่เหมาะสมจากความต้องการของลูกค้าโดยฝ่ายขาย ได้แก่ การจัดตารางการผลิต (Scheduling) ตามความต้องการเดิมของลูกค้า และการเปลี่ยนตารางการผลิต (Re-scheduling) จากความต้องการใหม่ของลูกค้า โดยวิธี GASPM เปรียบเทียบสมรรถนะของคำตอบวิธี NSGAI พบว่า สมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงของวิธี GASPM จะมีอัตราการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงที่ดีกว่าวิธี NSGAI และสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบของวิธี GASPM มีการกระจายที่สม่ำเสมอและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าวิธี NSGAI แสดงดัง Table 3

ผลการทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งาน (Table 4) พบว่า การยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านการดำเนินตามขั้นตอนของโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก ($Mean = 4.35$) การยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านการออกแบบโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก ($Mean = 4.46$) การยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านลักษณะทั่วไปมีความเหมาะสมมากที่สุด ($Mean = 4.75$) และการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านภาพรวมของโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก ($Mean = 4.47$)

สรุปและอภิปรายผล

โปรแกรมการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตาม

แนวคิดการก่อกองทราย ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ โปรแกรมประมวลผลวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายซึ่งอยู่ในรูปแบบไฟล์ "gaspm.ini" สำหรับทำหน้าที่การจัดลำดับความเหมาะสมของตารางการผลิต และโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานสำหรับทำหน้าที่ดึงข้อมูลที่ใช้สำหรับประมวลผลการจัดลำดับงานผลิตจากระบบ ERP และการจัดลำดับงานผลิตแสดงผลตารางการผลิตรวมถึงการตอบโต้กับผู้ใช้งาน โดยการทดสอบสมรรถนะของคำตอบของวิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทราย (GASPM) เปรียบเทียบกับสมรรถนะของคำตอบวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำรุ่นที่ 2 (NSGAI) จากชุดปัญหา DTLZ และฟังก์ชันการผลิตที่เหมาะสม พบว่า สมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงของวิธี GASPM จะมีอัตราการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงที่ดีกว่าวิธี NSGAI และสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบของวิธี GASPM มีการกระจายที่สม่ำเสมอมากกว่าวิธี NSGAI

การศึกษา พบว่า การแก้ปัญหาการจัดลำดับงานผลิตโดยโปรแกรมการจัดลำดับงานผลิตด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมจากการสร้างฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ตามแนวคิดการก่อกองทรายสามารถจัดลำดับงานผลิตใหม่ให้เหมาะสมได้อย่างอัตโนมัติด้วยการเปลี่ยนตารางการผลิตเดิม (Scheduling) เป็นตารางการผลิตแบบตามงาน

(Re-scheduling) สำหรับโปรแกรมตารางการผลิตแบบตามงานได้ทดสอบการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งาน พบว่าการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านการดำเนินการตามขั้นตอนของโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก การยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านการออกแบบโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก การยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านลักษณะทั่วไปมีความเหมาะสมมากที่สุด และการยอมรับการใช้เทคโนโลยีของผู้ใช้งานด้านภาพรวมของโปรแกรมมีความเหมาะสมมาก

อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวแปรตัดสินใจได้แก่ เวลากำหนดส่งของงานผลิต และต้นทุนการผลิตที่ใช้ในแต่ละสถานี่งานผลิต ในอนาคตอาจจะเลือกตัวแปรตัดสินใจในด้านอื่นๆ มาพิจารณา เช่น ต้นทุนการตั้งเครื่องจักร ต้นทุนเสียโอกาสในการผลิต เป็นต้น และงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมรรถนะของคำตอบที่แท้จริงด้วยชุดปัญหา DTLZ โดยใช้ DTLZ1-4 แบบ 2 วัตถุประสงค์มาใช้เปรียบเทียบกับทดสอบเท่านั้น ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปควรจะทำการศึกษาทดสอบกับชุดปัญหา DTLZ ที่มีวัตถุประสงค์มากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- Al-Salem, M., Bedoya-Valencia, L., & Rabadi, G. (2016). Heuristic and exact algorithms for the two-machine just in time job shop scheduling problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 5, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6591632>.
- Bhongade, A.S. & Khodke, P. M. (2012). Heuristics for production scheduling problem with machining and assembly operations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3, 185–19.
- Calis, B., & Bulkan, S. (2015). A research survey: review of AI solution strategies of job shop scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing, Computing*, 26(5), 961-973.
- Fernandes, C.M., Laredo, J.L.J, Rosa, A.C. & Merelo, J.J. (2013). The sandpile mutation Genetic Algorithm: an investigation on the working mechanisms of a diversity-oriented and self-organized mutation operator for non-stationary functions, *Appl Intell*, 39, 279–306.
- Gupta, A., & Chauhan, S. (2015). A heuristic algorithm for scheduling in a flow shop environment to minimize makespa. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6, 173-184.
- Johnson, R., & Christensen, L. (2014). *Educational research quantitative, qualitative, and mixed approaches* (5th ed.). SAGE.
- Kalshetty, Y.R., Adamuthe, A.C., & Kumar, S.P. (2020). Genetic algorithms with feasible operators for solving job shop scheduling problem. *Journal of Scientific Research*, 64 (1), 310-321.
- Kashyap, N., Kumari, A., & Chhikara, R. (2020). Multi-objective Optimization using NSGA II for service composition in IoT. *Procedia Computer Science*, 167, 1928-1933.
- Pongchairerks, P. (2019). A two-level metaheuristic algorithm for the job-shop scheduling problem. *Complexity*, 2019, 1-11.
- Raeesi, M.R.N., & Kobt, Z. (2012). A memetic algorithm for job shop scheduling using a critical-path-based local search heuristic. *Memetic Computing*, 4(3), 231-245.
- Schutze, O., Martin, A., Lara, A., Alvarado, S., Salinas, E., & Coello, C.A.C. (2015). The directed search method for multi-objective memetic algorithms. *Computational Optimization and Applications*, 63(2), 305-332.
- Sonmez, R., & Uysal, F. (2015). Backward-forward hybrid genetic algorithm for resource-constrained multi project scheduling problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(5), 04014072.
- Sotskov, Y.N., Matsveichuk, N.M., & Hatsura, V.D. (2020). Two-machine job-shop scheduling problem to minimize the makespan with uncertain job durations. *Algorithms*, 13(1), 1-45.
- Turkyilmaz, A., Senvar, O., Unal, I., & Bulkan, S. (2020). A research survey: Heuristic approaches for solving multi objective flexible job shop problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(8), 1949-1983. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01547-4>
- Vakili, M.M., & Jahangiri, N. (2018). Content validity and reliability of the measurement tools in educational, behavioral, and health sciences research. *Journal of Medical Education Development*, 10(28), 106-119.
- Wang, C.L., Rong, G., Weng, W., & Feng, Y.P. (2015). Mining scheduling knowledge for job shop scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 800-805.

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง

Factors affecting drying of Pathum Thani 1 paddy using a pneumatic dryer with a curved drying pipe

เจษฎา แพรกนันทะ^{1*}, มณฑล ชูชนาค¹, มุस्ताฟา ยะภา¹, เอนก สุทธิฤทธิ์¹
Jetsada Phraeknanthoe^{1*}, Monthon Chuchonak¹, Mustafa Yapa¹, Anek Sutthirit¹

Received: 10 November 2021 ; Revised: 7 January 2021 ; Accepted: 7 February 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือก, ความเร็วอากาศร้อน, และอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29 ถึง 30% (w.b.) โดยใช้เวลาอบแห้ง 60 min และทำการทดลองอบแห้งที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h, ความเร็วอากาศร้อน 19 ถึง 21 m/s, และอุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 130°C จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกลดลงตามอัตราการไหลของข้าวเปลือกและอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความเร็วอากาศร้อนให้ผลที่ยังไม่ชัดเจนถึงอิทธิพลที่มีต่อปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก สำหรับปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำสุดที่ได้จากการศึกษานี้ คือ 12% (w.b.) เกิดขึ้นที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h, ความเร็วอากาศร้อน 19 m/s, และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ท่ออบแห้งโค้ง การอบแห้ง ข้าวเปลือก ปริมาณความชื้น

Abstract

This research is to study factors affecting drying of Pathum Thani 1 paddy using a pneumatic dryer with a curved drying pipe to investigate influences of flow rate of paddy, hot air velocity, and drying temperature on reducing moisture content of Pathum Thani 1 paddy with initial moisture content of around 29 to 30% (w.b.) using drying time of 60 min. The experimental conditions of drying are carried out at the paddy flow rates of 114, 167, and 221 kg/h, the hot air velocities from 19 to 21 m/s, and the drying temperatures from 60 to 130°C. The experimental results show that the final moisture content of paddy decreases as the flow rate of paddy and the drying temperature increase. However, it is found that the hot air velocity unclearly affects the final moisture content of paddy. The lowest final moisture content obtained in this study, 12% (w.b.), occurs at the paddy flow rate of 221 kg/h, the hot air velocity of 19 m/s, and the drying temperature of 130°C.

Keywords: Pneumatic Dryer, Curved Drying Pipe, Drying, Paddy, Moisture Content

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

¹ Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep Nanglinchi Road, Thungmahamek, Sathon, Bangkok, 10120

* Corresponding author e-mail: jetsada.p@mail.rmutk.ac.th

บทนำ

ปริมาณความชื้นในข้าวเปลือก (moisture content of paddy) เป็นตัวแปรที่สำคัญ ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของข้าวเปลือก และราคาขายในท้องตลาด โดยหากค่าความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดของข้าวเปลือกเน่าเสียได้ง่าย หรือถ้าค่าความชื้นต่ำเกินไปอาจทำให้สูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์ และอาจทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการแตกหักและการเสื่อมคุณค่าทางโภชนาการ โดยปกติค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ดีในขณะการเก็บเกี่ยวจะอยู่ระหว่าง 24 ถึง 30% (w.b.) แต่ช่วงความชื้นที่เหมาะสมกับการเก็บรักษาควรอยู่ประมาณ 13 ถึง 15% (w.b.) (ฉัตรชัย นิมมล, 2555; Kaensup *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่ยังสามารถป้องกันการแตกหักและการเสื่อมคุณค่าทางอาหารได้อีกด้วย ก่อให้เกิดการคิดค้นวิธีการลดความชื้นของข้าวเปลือกซึ่งมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุดคือการตากแดด ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยธรรมชาติทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและไม่ยุ่งยาก แต่มีข้อจำกัดในด้านแรงงานและต้องใช้พื้นที่ตากจำนวนมาก ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือกในปริมาณมาก และไม่สอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามเกษตรกรจำเป็นต้องมีการควบคุมความชื้นข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับการเก็บรักษา ก่อนเพื่อเพิ่มราคาขายของข้าวเปลือก จึงได้มีการประดิษฐ์เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก (artificial dryer) มาช่วยในการลดความชื้น เพราะสามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้จำนวนมากและใช้เวลาสั้น นอกจากนั้นยังสามารถอบแห้งได้ทุกสภาพอากาศ และสามารถควบคุมความชื้นได้ตามระดับที่ต้องการมากกว่าการตากแดด

เครื่องอบแห้งที่สามารถใช้ในการลดความชื้นข้าวเปลือกมีหลายรูปแบบ ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed dryer), เครื่องอบแห้งแบบสปูเตดเบด (spouted bed dryer), หรือเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave dryer) (Bhandari, 2015) เป็นต้น แต่ยังมีอีกหนึ่งหนึ่งที่ได้รับการสนใจคือเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic dryer) เนื่องจากมีการพิจารณาว่าข้าวเปลือกเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (particulate material) โดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการลดความชื้นและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น (ฉัตรชัย นิมมล, 2555) สำหรับกระบวนการลดความชื้นวัสดุของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ จะเกิดขึ้นภายในท่ออบแห้ง (drying pipe) หรือหออบแห้ง (drying column) ซึ่งเป็นท่อตรงที่ติดตั้งในแนวตั้ง โดยมีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษารอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งสามารถแบ่งเป็น กลุ่มการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เพื่อศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่ออบแห้ง รวมถึงสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม (Bunyanichakul *et al.*, 2007; Kemp *et al.*, 1991; Kemp, 1994; Tanaka

et al., 2008) และกลุ่มที่ศึกษาการอบแห้งโดยสร้างเครื่องอบแห้งและทดลองอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือก ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก, ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก, อุณหภูมิอบแห้ง, อัตราการป้อนข้าวเปลือก, และความเร็วอากาศร้อน (อากาศอบแห้ง) เป็นต้น รวมถึงการพัฒนาท่ออบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ซึ่งเป็นการสร้างเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งแนวตั้งที่มีความสูงอยู่ระหว่าง 4.5 ถึง 6 m (ฉัตรชัย นิมมล, 2555; Kaensup *et al.*, 2006; Kaensup *et al.*, 2006; Nimmol, 2020) เพื่อให้ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งนานเพียงพอต่อการลดความชื้นให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานการเก็บข้าวเปลือก โดยพบว่าวิธีการอบแห้งดังกล่าวนี้ต้องใช้พื้นที่ในแนวตั้งที่สูงและต้องมีโครงสร้างรองรับน้ำหนักของท่ออบแห้งแนวตั้งที่แข็งแรงเพียงพอ และไม่สามารถติดตั้งในอาคารที่มีขนาดความสูงปกติได้ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ว่า หากเปลี่ยนท่ออบแห้งแนวตั้งมาเป็นท่ออบแห้งโค้งก็จะสามารถแก้ไขปัญหาพื้นที่ติดตั้งท่อในแนวตั้งได้ และสามารถเพิ่มความยาวของท่ออบแห้งได้อีกทาง นอกจากนั้นยังสามารถส่งผลให้ระบบการอบแห้งกลายเป็นระบบหมุนเวียนซ้ำ (recirculation system) เพราะข้าวเปลือกจะหมุนเวียนในเครื่องอบแห้งไปเรื่อยๆ โดยอากาศร้อนจะถูกระบายทิ้งสู่บรรยากาศผ่านไซโคลน ในขณะที่ข้าวเปลือกจะไหลวนเข้าเครื่องอบแห้งอีกครั้ง ซึ่งก่อให้เกิดความสามารถในการกำหนดเวลาอบแห้งได้ตามต้องการ และไม่ต้องคำนึงถึงความสูงของท่ออบแห้ง นอกจากนั้นยังสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้รวดเร็ว และใช้ต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้งที่ต่ำ (มณฑล ชูโชนาค และคณะ, 2557; วิทยา แก้วสวัสดิ์ และคณะ, 2557; สุพงษ์ชัย นาคสังข์ และคณะ, 2556; เอนก สุทธิฤทธิ์ และคณะ, 2560)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือก, ความเร็วอากาศร้อน, และอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก ประกอบไปด้วยปริมาณความชื้นชั้นนอกและชั้นในของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับหน่วยที่นิยมใช้บ่งบอกถึงปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก คือค่าร้อยละของปริมาณความชื้น (percentage of moisture content) ซึ่งหาได้โดยการนำเมล็ดข้าวเปลือกไปอบแห้งด้วยความร้อนจนกระทั่งเมล็ดแห้ง โดยมวลของเมล็ดที่หายไปก็คือปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก

การหาค่าร้อยละของปริมาณความชื้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 มาตรฐาน ได้แก่

1. มาตรฐานเปียก (wet basis) สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100\% \quad (1)$$

2. มาตรฐานแห้ง (dry basis) สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (2)$$

โดย M_w คือปริมาณความชื้น (มาตรฐานเปียก) (% w.b.), M_d คือปริมาณความชื้น (มาตรฐานแห้ง) (% d.b.), w คือมวลเปียก (kg), และ d คือมวลแห้ง (kg)

การถ่ายเทความร้อนและมวล

การอบแห้งข้าวเปลือกเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 2 รูปแบบ ได้แก่ การพาความร้อน และการนำความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนของข้าวเปลือก เริ่มต้นจากการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนที่ไหลผ่านผิวชั้นนอกของเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้ผิวชั้นนอกของข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่าน โดยการถ่ายเทความร้อนนี้เรียกว่า การพาความร้อน (heat convection) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$q_{conv} = h_d A_s (T_d - T_s) \quad (3)$$

เมื่อ q_{conv} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (W), h_d คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) ซึ่งแปรผันตามความเร็วอากาศร้อน V_a และอุณหภูมิอบแห้ง T_d , A_s คือพื้นที่ผิวชั้นนอกของเมล็ดข้าวเปลือกที่สัมผัสกับอากาศร้อน (m^2), T_d คืออุณหภูมิของอากาศร้อน ($^\circ C$), และ T_s คืออุณหภูมิที่ผิวชั้นนอกของเมล็ดข้าวเปลือก ($^\circ C$)

การพาความร้อนจะทำให้ผิวชั้นนอกของเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงกว่าชั้นในของเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวชั้นนอกเข้าสู่ชั้นในของเมล็ดข้าวเปลือก โดยการถ่ายเทความร้อนนี้เรียกว่า การนำความร้อน (heat conduction) ดังแสดงในสมการที่ (4)

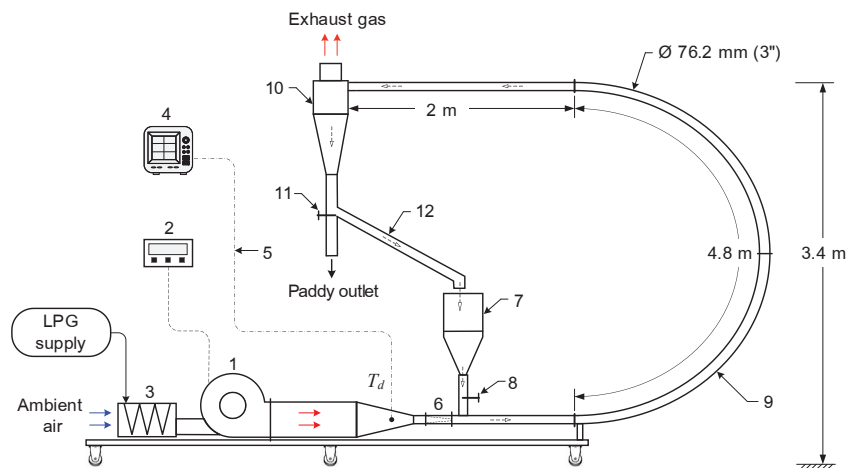
$$q_{cond} = -k_d A_{cond} \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

เมื่อ q_{cond} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (W), k_d คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือก ($W/m \cdot ^\circ C$) ซึ่งแปรผันตามปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก และอุณหภูมิอบแห้ง, A_{cond} คือพื้นที่การนำความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือก (m^2), dT คือความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวชั้นนอกและชั้นในเมล็ดข้าวเปลือก ($^\circ C$), และ dx คือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนผ่าน (m)

การถ่ายเทมวล (mass transfer) ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration difference) ของมวลนั้นๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่สูงกว่าจะเคลื่อนย้ายไปยังอากาศร้อนที่มีปริมาณความชื้นในอากาศต่ำกว่า ดังนั้น จากกฎของการอนุรักษ์มวล (mass conservation law) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Bunyawanichakul et al., 2007) คือ

$$\dot{m}_p \frac{dM}{dL} = \dot{m}_f \frac{dW}{dL} \quad (5)$$

เมื่อ \dot{m}_p และ \dot{m}_f คืออัตราการไหลเชิงมวลต่อพื้นที่ของข้าวเปลือกและอากาศชื้น (mass flux for paddy and moist air) ($kg/m^2 \cdot s$) ตามลำดับ, M คือปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก (มาตรฐานแห้ง) ($kg_{water}/kg_{dry\ material}$), W คือความชื้นในอากาศ ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$), และ L คือความยาวท่ออบแห้ง (m)



(1) เครื่องเป่าอากาศ, (2) ตัวควบคุม, (3) ห้องเผาไหม้, (4) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ, (5) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K, (6) หัวฉีด, (7) ถังป้อนข้าวเปลือก, (8) สไลด์ตัวลว, (9) ท่ออบแห้ง, (10) ไซโคลน, (11) วาล์วควบคุมทิศทาง, (12) ท่อลำเลียงข้าวเปลือก

Figure 1 Schematic diagram of a pneumatic dryer with a curved drying pipe

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้งที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงดัง Figure 1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ตามหมายเลขที่ได้ระบุไว้ ดังนี้ (1) เครื่องเป่าอากาศ (blower) ขนาด 1.1 kW ทำหน้าที่สร้างการไหลของอากาศเพื่อเป็นสารตัวกลางในการพาข้าวเปลือกให้เคลื่อนที่ในระบบอบแห้ง ซึ่งสามารถสร้างความเร็วของอากาศสูงสุดได้ 21 m/s, (2) ตู้ควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วอากาศในระบบอบแห้ง โดยความเร็วอากาศจะถูกวัดที่ตำแหน่งทางออกของท่ออบแห้งโดยใช้หัววัดความเร็วอากาศแบบใบพัด (vane probe) ที่มีช่วงการวัด 0 ถึง 40 m/s ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องวัดความเร็วอากาศ (Testo, 400, Germany), (3) ห้องเผาไหม้ (combustion chamber) ซึ่งติดตั้งเตาอินฟราเรด (infrared gas burner) เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ซึ่งสามารถสร้างอุณหภูมิอบแห้งสูงสุดได้ 150°C, (4) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (temperature data logger) (Yokogawa, MV2000, Japan) ใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิอบแห้งจากการทดลอง, (5) เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิอบแห้ง (อุณหภูมิอากาศร้อน) ที่ตำแหน่ง T_d เพื่อส่งข้อมูลที่ได้จากการวัดไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ, (6) หัวฉีด (nozzle) ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของอากาศร้อนให้กับระบบอบแห้ง, (7) ถังป้อนข้าวเปลือก (hopper) เป็นอุปกรณ์รูปทรงกรวยที่ใช้ในการป้อนข้าวเปลือกเข้าเครื่องอบแห้ง, (8) สไลด์วาล์ว (slide valve) ใช้สำหรับควบคุมปริมาณการป้อนข้าวเปลือกเข้าสู่เครื่องอบแห้ง (ควบคุมอัตราการไหลของข้าวเปลือก), (9) ท่ออบแห้ง (drying pipe) ที่ทำมาจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm (3 in) ประกอบด้วยท่อโค้ง (curved pipe) ยาว 4.8 m และท่อตรง (straight pipe) ยาว 2 m ซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวล (ความชื้น) ระหว่างข้าวเปลือกและอากาศร้อน, (10) ไซโคลน (cyclone) ทำหน้าที่แยกข้าวเปลือกออกจากอากาศร้อน และกรองฝุ่นที่เกิดขึ้นหลังการอบแห้ง, (11) วาล์วควบคุมทิศทาง ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลเวียนของข้าวเปลือกในระบบอบแห้ง, และ (12) ท่อลำเลียงข้าวเปลือก (paddy conveying pipe) ทำหน้าที่ลำเลียงข้าวเปลือกจากไซโคลนเข้าถังป้อนเพื่อทำการอบแห้งในระบบอย่างต่อเนื่องจนครบตามเงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด

หลักการการทำงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง เริ่มต้นจากเปิดเครื่องเป่าอากาศเพื่อสร้างอัตราการไหลของอากาศให้กับระบบอบแห้ง และปรับความเร็วอากาศร้อนให้อยู่ในระดับที่ต้องการใช้อบแห้ง โดยเครื่องเป่าอากาศจะดูดอากาศ (ambient air) ให้ไหลผ่านเข้าไปยังห้องเผาไหม้ อากาศจะได้รับความร้อนจากเตาอินฟราเรดที่ใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งก่อให้เกิดความร้อนและถ่ายเทให้กับอากาศ ส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นและ

ผ่านออกไปกลายเป็นอากาศร้อน (hot air) ที่มีอุณหภูมิสูง รอจนกระทั่งอากาศร้อนดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าที่ต้องการ และเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) หลังจากนั้นเริ่มปล่อยข้าวเปลือกจากถังป้อนข้าวเปลือกเข้าเครื่องอบแห้ง โดยอากาศร้อนจะพาข้าวเปลือกเคลื่อนตัวไปในท่ออบแห้งตามลักษณะการอบแห้งแบบพาหะลม (pneumatic drying) ซึ่งความเร็วอากาศร้อนต้องมากกว่าความเร็วตกอิสระของข้าวเปลือก และความเร็วอากาศร้อนจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วของข้าวเปลือก ซึ่งก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวล (ความชื้น) ตลอดช่วงความยาวของท่ออบแห้ง จนกระทั่งข้าวเปลือกถูกแยกออกจากอากาศร้อนที่ไซโคลน โดยอากาศร้อนจะถูกระบายทิ้งออกสู่บรรยากาศทางช่องด้านบนของไซโคลน ในขณะที่เดียวกันข้าวเปลือกจะตกลงสู่ด้านล่างผ่านวาล์วควบคุมทิศทาง ในกรณีที่อยู่ระหว่างทำการอบแห้ง ข้าวเปลือกจะถูกส่งไปยังถังป้อนข้าวเปลือกเพื่อเริ่มการอบแห้งซ้ำต่อไปจนครบตามกำหนดเวลาที่ต้องการอบแห้ง หลังจากนั้นปรับให้วาล์วควบคุมทิศทางเปลี่ยนทิศทางการไหลของข้าวเปลือกไปยังท่อทางออกของข้าวเปลือก (paddy outlet) และเก็บลงในถังเก็บต่อไป

การศึกษาทำโดยการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) ประมาณ 29 ถึง 30% (w.b.) ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง ซึ่งทำการอบแห้งที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h, ความเร็วอากาศร้อน 19, 20, และ 21 m/s, และอุณหภูมิอบแห้ง 60, 80, 90, 110, และ 130°C ตามลำดับ โดยใช้เวลาการอบแห้งทั้งหมด 60 นาที สำหรับการอบแห้งเริ่มต้นโดยปรับตั้งเครื่องอบแห้งให้มีความเร็วอากาศร้อน และอุณหภูมิอบแห้ง เป็นไปตามเงื่อนไขการอบแห้งที่กำหนด โดยความเร็วอากาศร้อนวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วอากาศ และอุณหภูมิอบแห้งจะถูกบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิผ่านเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัว หลังจากนั้นเริ่มปล่อยข้าวเปลือกจากถังป้อนข้าวเปลือกตามอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่กำหนด เพื่อลำเลียงเข้าสู่เครื่องอบแห้ง โดยข้าวเปลือกบางส่วนจะถูกนำออกมาเพื่อวัดปริมาณความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นเมลิทพีซ (EE-KU, เกษตร 60 ปี, ไทย) และทำการบันทึกผลทุก 5 นาที ซึ่งเริ่มตั้งแต่ 5 จนถึง 60 นาที ตามลำดับ ในที่นี้จะนำผลของปริมาณความชื้นสุดท้าย M_f (final moisture content) ของข้าวเปลือกหลังสิ้นสุดการอบแห้ง มาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือก F_r (flow rate of paddy) ในระบบ, ความเร็วอากาศร้อน V_a (hot air velocity), และอุณหภูมิอบแห้ง T_d (drying temperature) ที่มีผลต่อการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง ที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h, ความเร็วอากาศร้อน 19, 20, และ 21 m/s, และอุณหภูมิอบแห้ง 60,

80, 90, 110, และ 130°C ตามลำดับ โดยนำผลที่ได้จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือก, ความเร็วอากาศร้อน, และอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก ดังต่อไปนี้

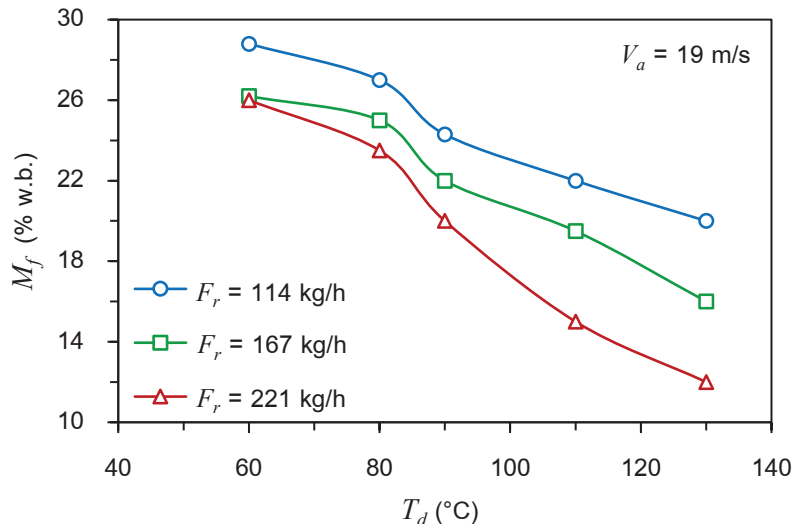


Figure 2 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $V_a = 19$ m/s for the different flow rates of 114, 167, and 221 kg/h

Figure 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $V_a = 19$ m/s ของอัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง และที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C จะพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่สูงกว่า 167 kg/h ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก ต่อมาในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 80°C พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายลดลงค่อนข้างช้า หลังจากนั้นจะลดลงเร็วขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิอบแห้ง 130°C โดยอัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h มีแนวโน้มการลดปริมาณความชื้นที่เร็วกว่าอัตราการไหลอื่นๆ อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80°C ที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 167 kg/h แทบไม่มีประโยชน์แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วอากาศร้อน 19 m/s พบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 12% (w.b.)

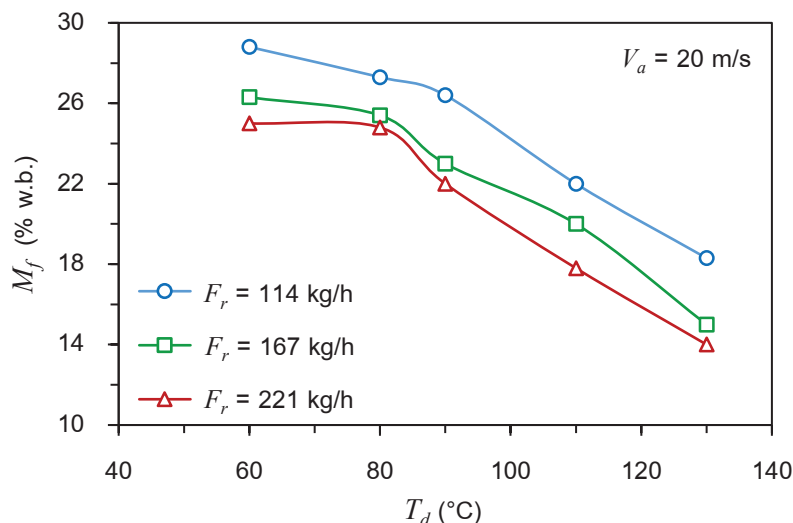


Figure 3 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $V_a = 20$ m/s for the different flow rates of 114, 167, and 221 kg/h

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $V_a = 20$ m/s ของอัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น และที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันยังพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกสูงกว่าจะมีปริมาณความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 80°C โดยรวมจะพบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายลดลง

ค่อนข้างช้า ต่อมาจะลดลงเร็วขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิอบแห้ง 130°C นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80°C ที่อัตราการไหล 167 และ 221 kg/h แทบจะไม่มีประโยชน์ แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วอากาศร้อน 20 m/s พบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 14% (w.b.)

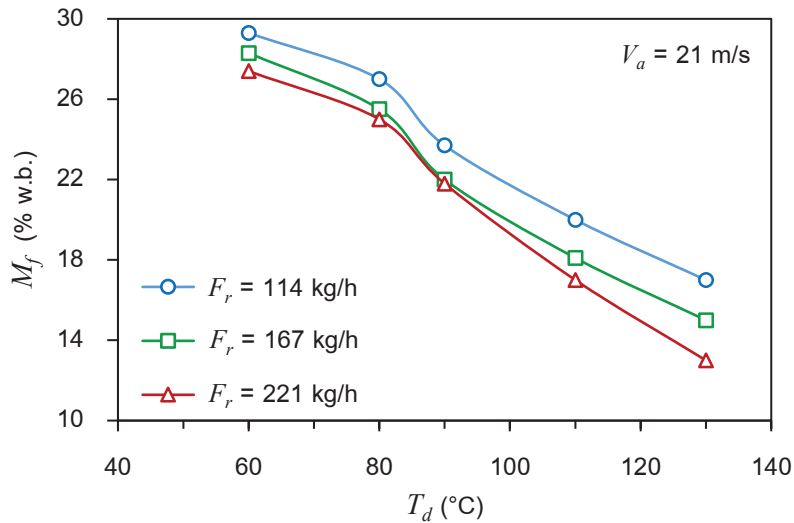


Figure 4 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $V_a = 21$ m/s for the different flow rates of 114, 167, and 221 kg/h

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $V_a = 21$ m/s ของอัตราการไหลของข้าวเปลือก 114, 167, และ 221 kg/h พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น และที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันยังพบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกสูงกว่าจะมีปริมาณความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า โดยปริมาณความชื้นสุดท้ายของอัตราการไหลต่างๆ จะมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 80 ถึง 90°C พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายที่อัตราการไหล 167 และ 221 kg/h มีค่าใกล้เคียงกัน

นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่า แนวโน้มปริมาณความชื้นในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80°C จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และลดลงอย่างรวดเร็วขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 90°C ต่อมาจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิอบแห้ง 130°C นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของข้าวเปลือกสูงกว่า 167 kg/h ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 80 ถึง 90°C ไม่มีผลต่อการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วอากาศร้อน 21 m/s พบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดอยู่ที่ 13% (w.b.)

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $F_r = 114$ kg/h ของความเร็วอากาศร้อน 19, 20, และ 21 m/s พบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกลดลง โดยที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำกว่า 80°C พบว่ามีปริมาณความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกันทุกความเร็วอากาศร้อน แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วอากาศร้อน 21 m/s ให้ผลลัพธ์ที่ดี

กว่าความเร็วอากาศร้อนอื่นๆ นอกจากนั้นผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วอากาศร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80°C ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นสุดท้าย แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 114 kg/h พบว่าความเร็วอากาศร้อน 21 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 17% (w.b.)

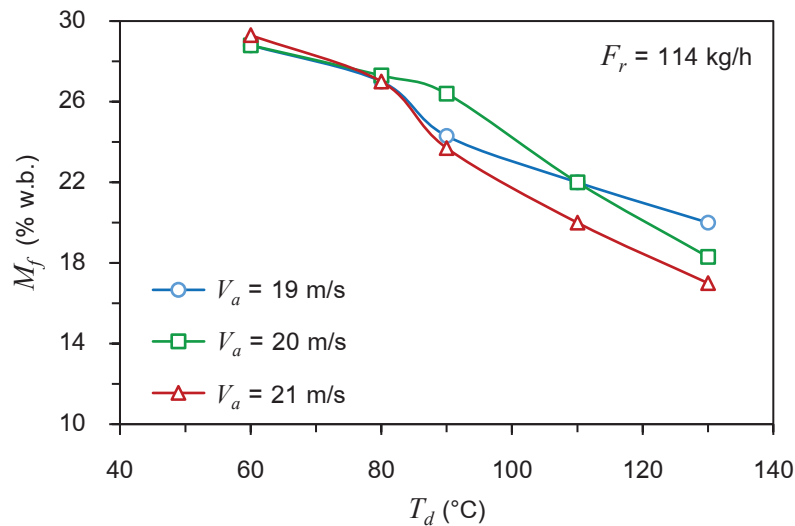


Figure 5 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $F_r = 114$ kg/h for the different hot air velocities of 19, 20, and 21 m/s

Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $F_r = 167$ kg/h ของความเร็วอากาศร้อน 19, 20, และ 21 m/s พบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายลดลง และที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ พบว่าความเร็วอากาศร้อนให้ผลที่ยังไม่ชัดเจนถึงอิทธิพลที่มีต่อปริมาณความชื้นสุดท้าย ซึ่งความเร็วอากาศร้อน 21 m/s ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ก่อให้

เกิดปริมาณความชื้นสุดท้ายที่สูงกว่าความเร็วอากาศร้อนอื่นอย่างชัดเจน และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วอากาศร้อนในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 60°C ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นสุดท้าย แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 167 kg/h พบว่าความเร็วอากาศร้อน 20 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 15% (w.b.)

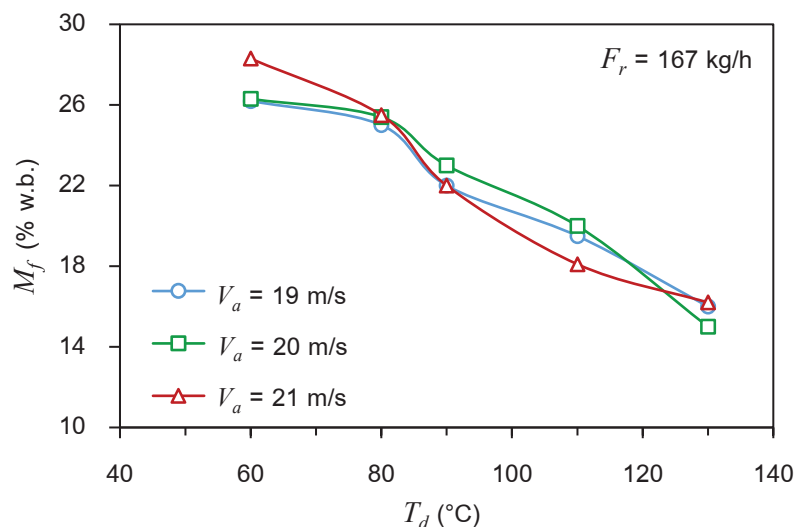


Figure 6 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $F_r = 167$ kg/h for the different hot air velocities of 19, 20, and 21 m/s

Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสุดท้ายกับอุณหภูมิอบแห้งที่ $F_r = 221$ kg/h ของความเร็วอากาศร้อน 19, 20, และ 21 m/s พบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกลดลง และที่ความเร็วอากาศร้อน 20 m/s พบว่ามีปริมาณความชื้นสุดท้ายคงที่ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 80°C ในขณะที่ความเร็วอากาศร้อน 19 และ 21 m/s ให้แนวโน้มที่สอดคล้องกัน นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 80 ถึง 130°C พบว่าความเร็วอากาศร้อน 20 และ 21 m/s

มีปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยรวมความเร็วอากาศร้อน 21 m/s ให้ผลที่ดีกว่า นอกจากนั้นจากผลการทดลองพบว่าความเร็วอากาศร้อน 19 m/s ก่อให้เกิดปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดอย่างชัดเจน และยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วอากาศร้อนเกิน 19 m/s ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นสุดท้าย แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h พบว่าความเร็วอากาศร้อน 19 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C สามารถอบแห้งข้าวเปลือกให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 12% (w.b.)

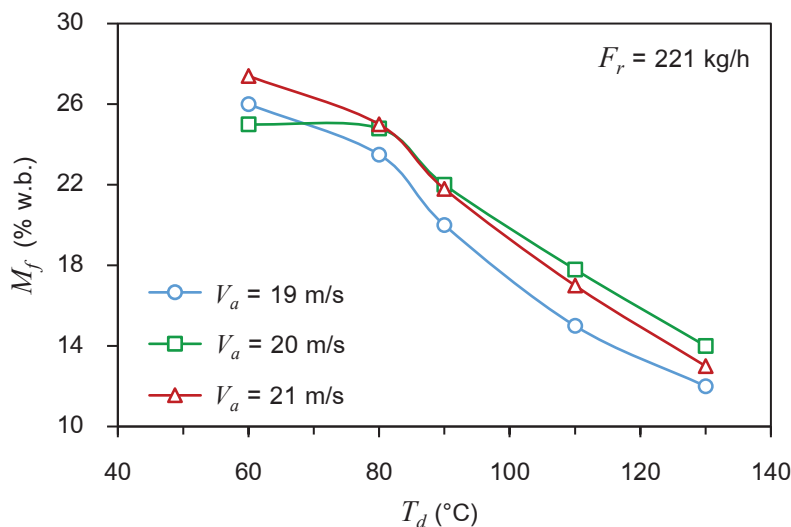


Figure 7 Relationship between the final moisture content and the drying temperature at $F_r = 221$ kg/h for the different hot air velocities of 19, 20, and 21 m/s

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง ทำให้เกิดอุณหภูมิแตกต่าง (different temperature) ระหว่างอากาศร้อนกับข้าวเปลือกมากขึ้น เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก ก็จะส่งผลให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวล (ความชื้น) ระหว่างอากาศร้อนกับผิวชั้นนอกของข้าวเปลือกได้รวดเร็วและมากกว่า เพราะว่าอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีความสามารถในการดูดซับปริมาณความชื้นในอากาศได้มากกว่า ดังนั้นการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าก็จะสามารถดึงความชื้นออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้เร็วและมากกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) และงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555)

ต่อมาหากพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่มีต่อการลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกต่ำจะทำให้ข้าวเปลือก

มีปริมาณความชื้นสุดท้ายที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าอัตราการไหลต่ำจะทำให้ข้าวเปลือกกระจายตัวในกระแสวนอากาศได้ดี ซึ่งควรส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนให้กับเมล็ดข้าวเปลือกทำได้ง่ายกว่าและสามารถถ่ายเทความร้อนและมวล (ความชื้น) ได้ดีกว่า (ฉัตรชัย นิยมมล, 2555; Kaensup *et al.*, 2006) แต่ในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้งกลับให้ผลที่ตรงข้ามกัน เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เพราะถึงแม้ว่าการทดลองจะใช้ปริมาณข้าวเปลือกในการอบแห้งแต่ละครั้งเท่ากัน แต่ได้กำหนดอัตราการไหล (ป้อน) ของข้าวเปลือกที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแตกต่างกัน โดยใช้สไลด์วาล์วที่ถึงป้อนข้าวเปลือกเป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของข้าวเปลือกที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง ประกอบกับการอบแห้งนี้ใช้หลักการหมุนวนข้าวเปลือกกลับเข้าอบแห้งซ้ำหลายรอบ ส่งผลให้ข้าวเปลือกที่ผ่านท่ออบแห้งในแต่ละรอบจะต้องไหลกลับไปยังถึงป้อนข้าวเปลือก เพื่อรอที่จะถูกป้อนเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้ง และถึงแม้ว่าการอบแห้งที่อัตราการไหลของข้าวเปลือกต่ำอาจจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลได้ดีกว่า แต่การอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลต่ำจะใช้เวลารอบที่ถึงป้อน

ข้าวเปลือกมากกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่อัตราการไหลสูงกว่า เพราะฉะนั้น เมื่ออัตราการไหลของข้าวเปลือกสูงก็จะทำให้ข้าวเปลือกสามารถไหลเวียนเข้าสู่ท่ออบแห้งอีกครั้งได้เร็วกว่า และมีเวลาที่อยู่ในท่ออบแห้งได้นานกว่า รวมถึงจำนวนรอบที่ข้าวเปลือกไหลวนผ่านท่ออบแห้งก็จะมากกว่าการอบแห้งที่มีอัตราการไหลต่ำ ซึ่งเป็นผลให้อากาศในการถ่ายเทความร้อนและมวลก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นถึงแม้ว่าการทดลองนี้จะใช้เวลาอบแห้งโดยรวม 60 นาทีเท่ากัน แต่เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้งจริงย่อมแตกต่างกันไปตามอัตราการไหลของข้าวเปลือก ส่งผลให้ข้าวเปลือกที่มีอัตราการไหลต่ำมีค่าปริมาณความชื้นสุดท้ายสูงกว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่มีอัตราการไหลสูง ในขณะที่งานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) และงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555) พบว่าการอบแห้งที่ใช้อัตราการไหลของข้าวเปลือกต่ำจะทำให้ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือกที่แตกต่างกัน เพราะงานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) และงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555) ได้ศึกษาปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่ทำการอบแห้งผ่านท่ออบแห้งเพียงแค่ออบแห้ง ในขณะที่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งโดยวนข้าวเปลือกเข้าท่ออบแห้งซ้ำหลายรอบจนครบตามเวลาอบแห้ง 60 นาที ดังนั้นถึงแม้ว่าอัตราการไหลของข้าวเปลือกต่ำกว่าจะทำให้อากาศร้อนสามารถดึงความชื้นออกจากข้าวเปลือกได้ดีกว่า แต่ความต่อเนื่องของการป้อนข้าวเปลือกที่ถึงป้อน, อัตราการไหลของข้าวเปลือก, ปริมาณของข้าวเปลือก, และเวลาที่ข้าวเปลือกต้องรอที่ถึงป้อนก่อนถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งอีกครั้ง ก็จะมีผลโดยตรงต่อแนวโน้มของปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้

สำหรับอิทธิพลของความเร็วอากาศร้อนที่มีต่อกรดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าจากการทดลองยังให้ผลที่ไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองความเร็วอากาศร้อนที่มีค่าใกล้เคียงกัน ได้แก่ 19, 20, และ 21 m/s ในขณะที่งานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) ได้ศึกษาความเร็วอากาศร้อน 20, 25, และ 30 m/s ส่วนงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555) เลือกศึกษาความเร็วอากาศร้อน 20 และ 30 m/s ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ ได้เลือกใช้ความเร็วอากาศร้อนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงให้ผลลัพธ์ที่สามารถเห็นถึงความแตกต่างของแนวโน้มที่ชัดเจนกว่า ส่วนเหตุผลที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ความเร็วอากาศร้อนที่มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะเครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสร้างความเร็วอากาศร้อนในท่ออบแห้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm ได้สูงสุดเพียง 21 m/s และจากการทดลองพบว่าความเร็วอากาศร้อนต่ำสุดที่สามารถพาข้าวเปลือกไปได้คือ 19 m/s ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาช่วงความเร็วอากาศร้อน

19 ถึง 21 m/s เพื่อให้สอดคล้องกับสมรรถนะของเครื่องเป่าอากาศ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) และงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555) โดยพบว่าถึงแม้ว่างานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) ใช้ท่ออบแห้ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm) ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่สามารถสร้างความเร็วอากาศร้อนได้สูงถึง 30 m/s ส่วนงานวิจัยของฉัตรชัย นิยมมล (2555) ใช้ท่ออบแห้ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm) ที่มีขนาดเล็กกว่า แต่ได้เลือกใช้เครื่องเป่าอากาศความดันสูงซึ่งสามารถสร้างความเร็วอากาศร้อนได้สูงถึง 30 m/s เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kaensup *et al.* (2006) ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องเป่าอากาศจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณา กำหนดช่วงความเร็วอากาศร้อนที่ทำการศึกษา แต่อย่างไรก็ตามความเร็วอากาศร้อนก็จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของข้าวเปลือก, เวลาที่ข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง, อัตราการไหลของข้าวเปลือก, และอุณหภูมิอบแห้ง ดังนั้นหากเลือกใช้ความเร็วอากาศร้อนที่เหมาะสมกับอัตราการไหลของข้าวเปลือกและอุณหภูมิอบแห้ง ก็จะสามารถลดปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกได้ดีขึ้น

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้งเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของข้าวเปลือก, ความเร็วอากาศร้อน, และอุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก พบว่าการอบแห้งรูปแบบนี้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ ปทุมธานี 1 ที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นประมาณ 29 ถึง 30% (w.b.) ให้เหลือปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 15% (w.b.) ภายในเวลาอบแห้ง 60 min มี 3 สภาวะ ซึ่งทั้งหมดเกิดขึ้นที่อัตราการไหลของข้าวเปลือก 221 kg/h และอุณหภูมิอบแห้ง 130°C โดยพบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำที่สุดคือ 12% (w.b.) เกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศร้อน 19 m/s รองลงมาคือปริมาณความชื้นสุดท้าย 13% (w.b.) ที่ความเร็วอากาศร้อน 21 m/s และอันดับที่สามคือปริมาณความชื้นสุดท้าย 14% (w.b.) ที่ความเร็วอากาศร้อน 20 m/s นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกจะลดลงตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และในทำนองเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกลดลง ในขณะที่ความเร็วอากาศร้อนให้ผลที่ยังไม่ชัดเจนถึงอิทธิพลที่มีต่อปริมาณความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง 60 ถึง 80°C มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นสุดท้ายค่อนข้างช้า หลังจากนั้นแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นสุดท้ายจะเร็วขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิอบแห้ง 130°C แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการศึกษานี้ใช้อุณหภูมิ

อบแห้งที่สูง จึงควรมีการศึกษาถึงวิธีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ รวมถึงการศึกษาผลกระทบของปัจจัยข้างต้นที่มีต่อคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งโค้ง เพื่อยืนยันถึงความเป็นไปได้สำหรับการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเกษตรต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ฉัตรชัย นิยมมล. (2555). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว. *วารสารวิจัย มช.*, 17(1), 97-109.
- มณฑล ชูโซชนาค, พิรสิทธิ์ ทวยนาค, และมุस्ताฟา ยะภา. (2557). ผลกระทบของความเร็วของอากาศร้อนต่อการลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้ต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบท่อ. *การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 13* (น. 18-23). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิทยา แก้วสวัสดิ์, มณฑล ชูโซชนาค, และมุस्ताฟา ยะภา. (2557). การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อ. *การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 13* (น. 12-17). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุพงษ์ชัย นาคสังข์, มณฑล ชูโซชนาค, และมุस्ताฟา ยะภา. (2556). การศึกษาเชิงทดลองการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อ. *การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12* (น. 94-99). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอนก สุทธิฤทธิ์, มณฑล ชูโซชนาค, เจษฎา แพรกนันทะ, และมุस्ताฟา ยะภา. (2560). การศึกษาอิทธิพลของอัตราการบินและอุณหภูมิที่มีผลต่อการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบท่อ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13* (น. 39-43). วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

Bhandari, B. (2015). *Handbook of Industrial Drying*, Edited by AS Mujumdar: CRC Press: Boca Raton, FL; 2015. ISBN: 978-1-4665-9665-8.

Bunyawanchakul, P., Walker, G.J., Sargison, J.E., & Doe, P.E. (2007). Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a simple pneumatic dryer. *Biosystems engineering*, 96(3), 335-344.

Kaensup, W., Kulwong, S., & Wongwises, S. (2006). A small-scale pneumatic conveying dryer of rough rice. *Drying Technology*, 24(1), 105-113.

Kaensup, W., Kulwong, S., & Wongwises, S. (2006). Comparison of drying kinetics of paddy using a pneumatic conveying dryer with and without a cyclone. *Drying Technology*, 24(8), 1039-1045.

Kemp, I.C., Oakley, D.E., & Bahu, R.E. (1991). Computational fluid dynamics modelling of vertical pneumatic conveying dryers. *Powder Technology*, 65(1-3), 477-484.

Kemp, I.C. (1994). Scale-up of pneumatic conveying dryers. *Drying Technology*, 12(1-2), 279-297.

Nimmol, C., Yodrux, A., & Hirunwat, A. (2020). Rapid drying of high-moisture paddy using a pneumatic dryer with corrugated-surface drying column. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 141, p. 01006). EDP Sciences.

Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., & Atungulu, G. G. (2008). Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder. *Journal of food Engineering*, 88(4), 492-498.

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

Thermal efficiency enhancement of a heat pipe evacuated-tube solar collector by installing a compound parabolic concentrating reflector

สรวิศ สอนสารี^{1*}, กฤษณา อ้นอ้าย¹
Sorawit Sonsaree^{1*}, Kritsada On-ai¹

Received: 21 October 2021 ; Revised: 20 December 2021 ; Accepted: 17 January 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ในการศึกษาแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ แผ่นสังกะสี และแผ่นสแตนเลส ที่มีความสูงของรางสะท้อนเท่ากับ 86.80 mm ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับหลอดแก้วสุญญากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33.80 mm และ 47.20 mm ที่มีความยาว 1,836 mm จำนวน 8 ท่อ ผลการศึกษาเปรียบเทียบในกรณีที่มีการติดตั้งและไม่มีติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่า เมื่อติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้ โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบจะมีค่าสูงสุดเมื่อระบบใช้แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นสังกะสี แต่หากพิจารณาถึงอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ระบบผลิตได้ พบว่า ระบบที่มีการใช้แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นสแตนเลสจะมีความเหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

Abstract

The goal of this study was to study the thermal efficiency enhancement of a heat pipe evacuated-tube solar collector by installing a compound parabolic concentrating (CPC) reflector. The reflector was composed of two distinct materials: galvanized sheet and stainless steel sheet. Eight vacuum glass tubes with inner and outer diameters of 33.80 mm and 47.20 mm, and a length of 1,836 mm were utilized with a CPC reflector height of 86.20 mm. The results of studies comparing the thermal efficiency provided by solar water heating system (SWHS) with and without CPC reflectors revealed that installing CPC reflectors could increase the heat quality produced by the SWHS. When CPC reflectors made of galvanized sheet were used, the system's thermal efficiency reached its highest. In addition, when it achieved the highest hot water temperature that the system could provide. The method utilizing CPC reflectors constructed of stainless steel sheets was discovered to be the most appropriate.

Keywords: Solar Water Heating System (SWHS), heat pipe evacuated-tube collector, Compound Parabolic Concentrating (CPC) reflector.

¹ อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000

^{1*} Lecturers, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok Province, 65000

* Corresponding author Tel.: 063-3344448, E-mail address: sorawitsonsaree@psru.ac.th

บทนำ

การนำเอาพลังงานทดแทนมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ เพื่อลดการใช้พลังงานฟอสซิลนั้นถือว่ามีมีความสำคัญและมีความท้าทายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ประเทศกำลังประสบกับวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน โดยหนึ่งในวิธีการสำคัญในการลดการใช้พลังงานฟอสซิลในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การนำเอาพลังงานทดแทนมาใช้แทน และเมื่อให้ความสำคัญไปที่พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) ประเทศไทยมีเป้าหมายในการใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดสัดส่วนการใช้พลังงานฟอสซิลในปี พ.ศ. 2580 อยู่ที่ 100 kTOE (พันต้นเทียบเท่าน้ำมันดิบ) และเมื่อพิจารณาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ประเทศไทยนั้นถือได้ว่าเป็นประเทศที่มีการใช้ประโยชน์จากรังสีดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูง โดยมีค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รวม (Total solar radiation) รายวันเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17.60 MJ/m²-day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) แต่เมื่อพิจารณาปริมาณรังสีอาทิตย์ในรูปแบบอื่น โดยเฉพาะปริมาณรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรง (Beam or direct solar radiation) พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพปริมาณรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะกับการนำเอาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน (Solar thermal power plant) ในรูปแบบอุณหภูมิสูงมาใช้แทน (Thawonngamyingsakul & Kiatsiriroat, 2012) อย่างไรก็ตามยังคงสามารถประยุกต์พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบความร้อนอื่นๆ เช่น การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ การทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบอุณหภูมิต่ำ (Sonsaree *et al.*, 2018) เป็นต้น นอกจากนี้เทคโนโลยีข้างต้นแล้วจะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาขีดความสามารถทางด้านเทคโนโลยี ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้หรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วให้สามารถทำงานได้ดีมากยิ่งขึ้น หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานอย่างคุ้มค่าหรือดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสนใจไปที่การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (Heat pipe evacuated-tube solar collectors) โดยการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (Compound Parabolic Concentrating (CPC) reflector) ผลการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่า สรวิต สอนสารี (2562) ได้ดำเนินการศึกษาผลของมุมสูงและวัสดุของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

ที่มีผลต่อการผลิตน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ โดยในการศึกษาวิจัยที่นำมาใช้สร้างแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ 3 ชนิด คือ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี และแผ่นสแตนเลส ที่มีความสูงของแผ่นสะท้อน 3 ความสูง คือ ความสูงสูงสุด 86.80 mm ความสูงปานกลาง 56.80 mm และความสูงต่ำสุด 28.40 mm ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายต่อพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ แผ่นสังกะสีที่มีความสูงต่ำสุด จะเหมาะสมที่สุด เนื่องจากระบบจะสามารถผลิตอุณหภูมิน้ำร้อนได้สูงที่สุด และมีค่าใช้จ่ายต่อพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ต่ำที่สุด Wu *et al.* (2021) ได้ดำเนินการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ผลการศึกษพบว่า ความสูงของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยให้การทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดตลอดช่วงระยะเวลาการทำงานตลอดปี Vijayakumar *et al.* (2019) พบว่าแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา เมื่อถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อน จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพความร้อน (อุณหภูมิน้ำร้อน) ในการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกับ Jiang *et al.* (2020), Pranesh *et al.* (2019) และ Tian *et al.* (2018) แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์จะช่วยให้ความสามารถในการผลิตน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ประกอบกับจะทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถทำงานร่วมกับเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในอนาคต นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อนำเอาแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะช่วยให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังกล่าวสามารถผลิตน้ำร้อนได้ตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวันโดยที่ไม่ต้องหมุนตามดวงอาทิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gao and Chen (2020) ที่ได้กล่าวว่า การออกแบบรูปลักษณะของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ดีนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงแสง (Optical efficiency) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ Li *et al.* (2020) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นต่อปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งและมีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ผลการศึกษพบว่า เมื่อต้องการผลิตพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาจะมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายต่อพลังงานที่ผลิตได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา Xia and Chen (2020) ได้ทำการออกแบบแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาลักษณะเล็กเพื่อนำมาติดตั้งใช้ร่วมกับตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ โดยในการติดตั้งแผ่นสะท้อนนั้นจะทำการย้ายจุดตัดของรูปประกอบพาราโบลาซึ่งโดยปกติจะอยู่ด้านหลังของหลอดแก้วใดหลอดแก้วหนึ่ง ย้ายมาอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างหลอดแก้ว (หลอดแก้วที่วางติดกัน) ผลการศึกษาพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาขนาดเล็กด้วยวิธีการดังกล่าว จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 27.3 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา Chamsa-ard *et al.* (2014) พัฒนา ออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 37 และ 47 mm ตามลำดับ ที่ทำงานร่วมกับแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ISO 9806-1 พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 78 และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (Heat loss coefficient) a_1 และ a_2 คือ 3.55 และ 0.06 W/m²-K ตามลำดับ

จากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าหากมีการประยุกต์ใช้แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดท่อความร้อน จะช่วยให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนได้สูงขึ้น หรือสามารถเพิ่มคุณภาพความร้อน (อุณหภูมิมีน้ำร้อน) ได้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาทำแผ่นสะท้อน ประกอบกับกระบวนการที่จะทำให้ได้ซึ่งปริมาณความร้อนที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานความร้อนจึงเป็นที่มาและความสำคัญของการศึกษางานวิจัยนี้

แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (Compound Parabolic Concentrating (CPC) reflector) เป็นตัวเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์แบบอยู่กับที่ (Fixed concentrator) (ไม่ต้องเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา) ประกอบกับแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลายังมีพื้นที่ผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่าแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Focusing concentrator) ดังนั้น จึงสามารถยอมให้มีความผิดพลาดของรูปแบบผิวสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้มากขึ้น โดยแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลามีอัตราส่วนรวมรังสีตามทฤษฎี (Concentration Ratio (CR)) ขึ้นอยู่กับ

ตัวกลางระหว่างตัวดูดรังสี ผิวสะท้อนรังสี และมุมรับรังสี (Acceptance angle) โดยอัตราส่วนรวมรังสีตามทฤษฎีแสดงดังสมการที่ (1) (Duffie & Beckman, 2013) ดังนี้

$$CR = \frac{n}{\sin\theta_c} \tag{1}$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์การหักเหแสง (Index of refraction) ของตัวกลางที่อยู่ระหว่างตัวรับรังสีกับรางสะท้อนรังสี และ คือ ครึ่งมุมรับรังสี (Acceptance half angle) โดยความสัมพันธ์ของความสูง (H) ความยาวโฟกัส (f) ครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) เส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี (a)) ของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ และสมการส่วนโค้งรูปพาราโบลา (BC) แสดงดังสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5) และ Figure 1 เมื่อ r คือ รัศมี d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และ β คือ มุมจุดศูนย์กลางท่อ (Angle central pipe)

$$H = \frac{a}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi \sin\theta_c} + \frac{1}{\tan\theta_c \sin\theta_c} \right) \tag{2}$$

$$f = \frac{a}{r} \tag{3}$$

$$BC = \beta \left(\frac{d}{2} \right) \tag{4}$$

$$BC = \frac{\left(\frac{d}{2} \right) \left[\left(\beta + \theta_c + \frac{\pi}{2} \right) - \cos(\beta - \theta_c) \right]}{1 + \sin(\beta + \theta_c)} \tag{5}$$

$$\text{เมื่อ } \theta_c + \frac{\pi}{2} \leq \beta \leq 3\frac{\pi}{2} - \theta_c$$

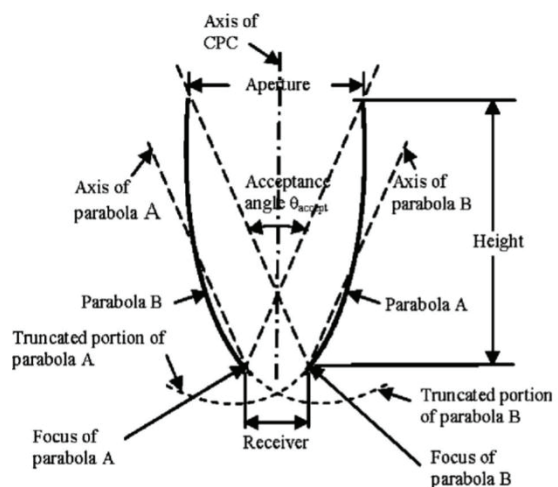


Figure 1 Cross section of a nontruncated CPC (Mgbemene *et al.*, 2010)

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar water heating system (SWHS)) อุปกรณ์หลักประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) ถังน้ำร้อน และปั๊มน้ำ หมุนเวียน โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะทำหน้าที่รับพลังงานจาก แสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนที่ได้รับให้กับน้ำที่ทำหน้าที่ เป็นตัวกลางในการรับความร้อน จากนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (น้ำร้อน) จะถูกนำไปใช้งาน และ/หรือ ถูกนำไปเก็บสะสมไว้ใน ถังน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนกันความร้อนก่อนที่จะถูกดึงออกไป ใช้งานต่อไป โดยปริมาณความร้อนที่ผลิตได้จากเครื่องทำ น้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (\dot{Q}_{coll}) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (η_{SWHS}) สามารถ แสดงได้ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ตามลำดับ ดังนี้

$$\dot{Q}_{coll} = \left(\frac{M}{Time} \right) c_p (T_{Final} - T_{Initial}) \quad (6)$$

$$\eta_{SWHS} = \frac{\dot{Q}_{coll}}{A_c I_T} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณน้ำในถัง (Liter, L) $TIME$ คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อน (second, s) $T_{Initial}$ และ T_{Final} คือ อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้น และอุณหภูมิน้ำในถังสุดท้าย ($^{\circ}C$) A_c คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2) (สำหรับงานวิจัยนี้ใช้พื้นที่ รวม หรือ Gross area ในการวิเคราะห์) และ I_T คือ ปริมาณ รังสีอาทิตย์ที่ได้รับ (รังสีอาทิตย์ชนิดรังสีรวม (Total solar radiation)) ($W/m^2 \cdot day$)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการ เพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ หลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่น สะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา รายละเอียด ของวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังนี้

1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิด ท่อความร้อน

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิด ท่อความร้อน (Heat pipe evacuated-tube solar collectors) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 33.80 mm และ 47.20 mm ตามลำดับ ที่มีความยาว 1,836 mm จำนวน 8 ท่อ ได้ถูกนำมาใช้ในระบบผลิตน้ำร้อนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ (สาเหตุที่ต้องใช้หลอดแก้วสุญญากาศ จำนวน 8 ท่อ ก็เนื่องมาจากเมื่อนำแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบ รูปประกอบพาราโบลามีความกว้าง 152.76 mm (มุมมอง ภาพด้านบนจาก Figure 2) มาต่อประกอบร่วมกันเป็นตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนที่มี การติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา จะทำให้มีมิติของขนาดพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รวม (Gross area) ประมาณ $2.20 m^2$ ที่ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้งานทั่วไป และมีขายตามท้องตลาด)

2. แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา

แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกัน 2 วัสดุ ที่มีความหนา 3 mm คือ (1) แผ่นสังกะสี และ (2) แผ่นสแตนเลส (ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ ไม่ได้นำวัสดุชนิดแผ่นอลูมิเนียมมาใช้งาน เนื่องจากในงาน วิจัยที่ผ่านมา (สรวิศ สอนสารี, 2562) พบว่า แผ่นอลูมิเนียม เป็นวัสดุที่ขึ้นเป็นรูปทรงรูปประกอบพาราโบลาได้ไม่ดี จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบ ความสามารถในการเพิ่มคุณภาพความร้อนของน้ำร้อนที่ ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในการ ออกแบบได้กำหนดให้มุมจุดศูนย์กลางท่อ (Angle central pipe (β)) และครึ่งมุมรับรังสี (Half angle) เท่ากับ 120.0° และ 11.5° ตามลำดับ (สรวิศ สอนสารี, 2562) จากนั้นได้ ตัดความสูงของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบ พาราโบลาให้มีความสูง 86.80 mm และความยาว 1,200 mm (ตามความยาวของวัสดุแผ่นที่มีขายตามท้องตลาด) แสดง ดัง Figure 2 และ Figure 3 ตามลำดับ

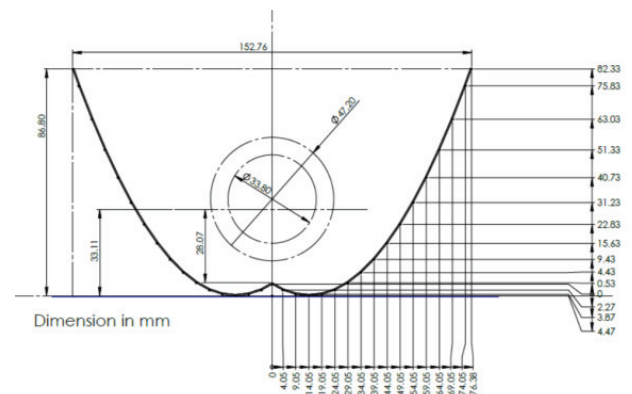


Figure 2 Cross section of a CPC reflectors that has been designed and fabricated

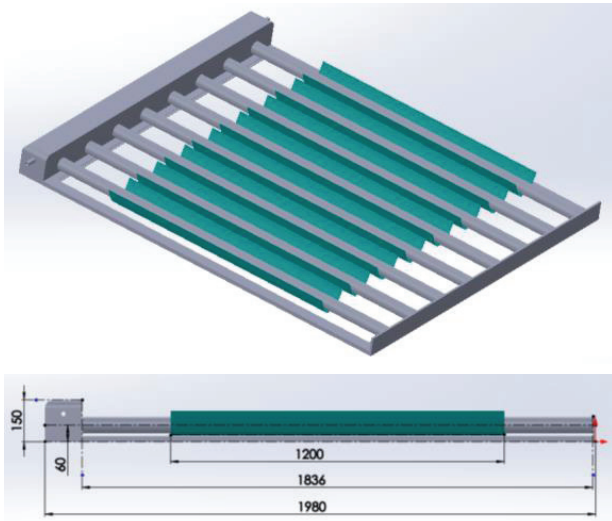


Figure 3 Length of the CPC reflectors when installed

3. การดำเนินการทดสอบ

การดำเนินการทดสอบจะเป็นการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานความร้อน และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ (1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (ไม่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา) (2) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ทำจากแผ่นสังกะสี และ (3) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ทำจากแผ่นสแตนเลส

ในการทดสอบนั้นได้กำหนดให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในถังน้ำร้อนที่มีการหุ้มฉนวนอย่างดีมีปริมาณน้ำในถังเท่ากับ 100 ลิตร และแต่ละระบบกำหนดให้มีอัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คือ 1 ถึง 3 LPM (ลิตรต่อนาที) (โดยเพิ่มครั้งละ 1 LPM) (สาเหตุสำคัญของการเลือกย่านอัตราการไหลดังกล่าว คือ เป็นการเลือกอัตราการไหลที่มีอัตราการไหลจากต่ำ (1 LPM) ไปหาอัตราการไหลสูง (3 LPM) ที่ซึ่งจะทำให้เห็นแนวโน้มของอัตราความร้อนและอุณหภูมิน้ำร้อนที่เครื่องทำน้ำร้อนผลิตได้ และจะเป็นแนวทางในการนำอัตราการไหลไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ในอนาคต) โดยจะแกรมการทดสอบอย่างง่ายแสดงดัง Figure 4 การทดสอบได้ดำเนินการบันทึกข้อมูลต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน ตั้งแต่เวลาเวลา 9.00 ถึง 15.30 น. ดังนี้ อุณหภูมิแวดล้อม (T_{Amb}) อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น ($T_{Initial}$) อุณหภูมิน้ำสุดท้าย (T_{Final}) อุณหภูมิน้ำภายในถังน้ำร้อนตลอดช่วงระยะเวลาระหว่างวัน ด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล Type K และปริมาณรังสีอาทิตย์ (I_p) ด้วยเซลล์อ้างอิง (Reference cell) ที่ถูกสอบเทียบกับเครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar power meter) ยี่ห้อ CEM รุ่น LA-107 โดยข้อมูลต่างๆ จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกอัตโนมัติยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8431-20 ทุกๆ 1 นาที (ตัวอย่างของอุปกรณ์ต่างๆ แสดงดัง Figure 5) ทั้งนี้ในการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะวางทำมุมเอียง 17° กับแนวระดับ (ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งละติจูดของจังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเป็นที่ตั้งของสถานที่ทดสอบ) และหันหน้าไปทางทิศใต้

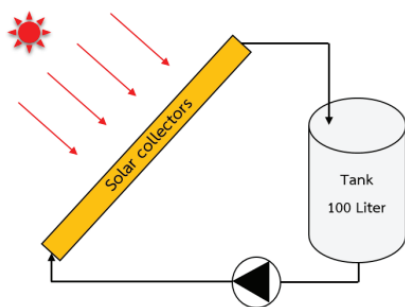


Figure 4 Single line diagram of the solar water heating system (SWHS)



(a) Thermocouple



(b) Data logger



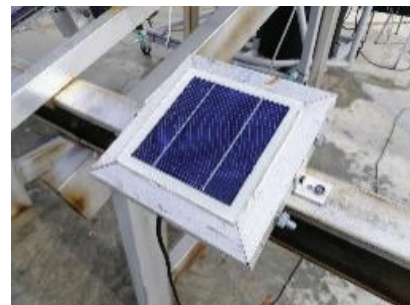
(c) Storage tank



(d) Flow meter



(e) Water pump



(f) Reference cell

Figure 5 Examples of installed tools

ผลการศึกษา และวิจารณ์ผลการศึกษา

ผลการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้ง 3 กรณี สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังนี้

1. กรณี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อน (ไม่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา)

ผลการศึกษาแสดงดัง Table 1 และ Figure 6 พบว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ระบบผลิตได้ตลอดช่วงระยะเวลา ระหว่างวันนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา โดยที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ ร้อยละ 18.30 รองลงมา คือ ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน 2 และ 3 LPM จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่

ร้อยละ 15.70 และ 15.21 ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 32.25 °C ไปเป็น 44.15 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 4,974.20 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 527.97 W/m² ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 2 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 32.90 °C ไปเป็น 46.45 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 5,663.90 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 700.92 W/m² และที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 3 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 33.49 °C ไปเป็น 48.30 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 6,193.37 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 791.48 W/m²

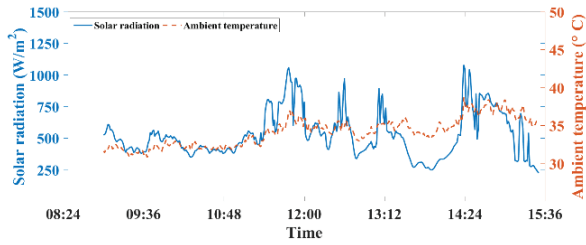
Table 1 Initial temperature, final temperature, thermal energy, and efficiency of the systems (without CPC reflectors)

Date	Flow (LPM)	T _{Initial} (°C)	T _{Final} (°C)	I _T (W/m ²)	Q _{Coll} (kJ)	Eff _{th} (%)
14-Aug-2021	1	31.57	43.40	525.98	4,946.33	18.27
25-Aug-2021	1	32.93	44.90	529.95	5,002.07	18.33
Average		32.25	44.15	527.97	4,974.20	18.30
19-Aug-2021	2	33.43	47.00	693.63	5,670.87	15.88
20-Aug-2021	2	32.37	45.90	708.21	5,656.93	15.52
Average		32.90	46.45	700.92	5,663.90	15.70
23-Aug-2021	3	33.30	48.40	807.89	6,311.80	15.18
24-Aug-2021	3	33.67	48.20	775.07	6,074.93	15.23
Average		33.49	48.30	791.48	6,193.37	15.21

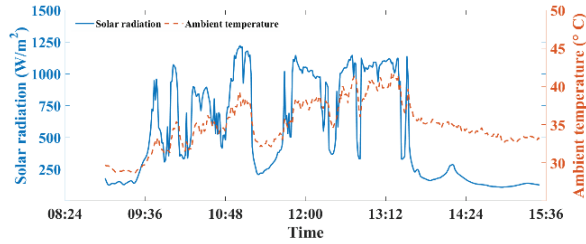
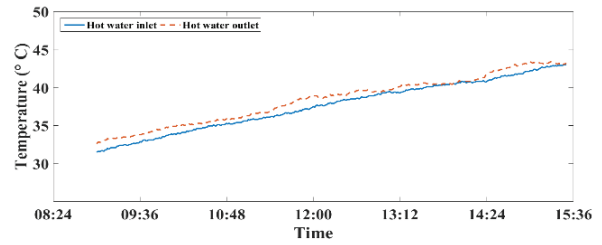
2. กรณี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อน ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ทำจากแผ่นสังกะสี

ผลการศึกษาแสดงดัง Table 2 และ Figure 7 พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 18.80 รองลงมา คือ ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน 2 และ 3 LPM จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 17.76 และ 14.86 ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 30.87 °C ไปเป็น 43.00 °C หรือคิดเป็นพลังงาน

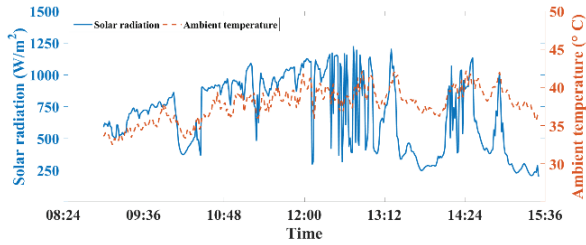
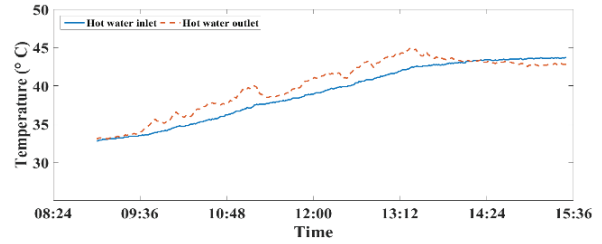
ความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 5,071.74 kJ (0.22 kW_{th}) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 522.32 W/m² ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 2 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 29.93 °C ไปเป็น 43.65 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 5,733.57 kJ (0.25 kW_{th}) เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 630.64 W/m² และที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 3 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 29.75 °C ไปเป็น 43.30 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 5,663.85 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 738.57 W/m²



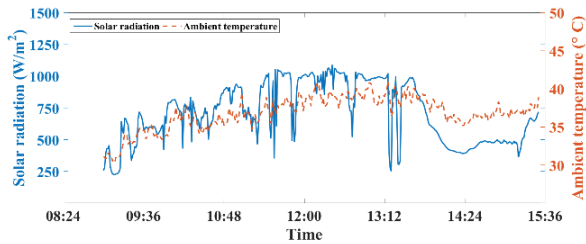
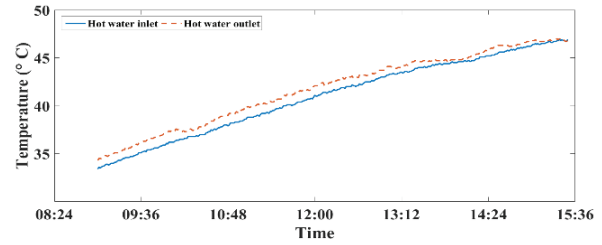
(a) 14 August 2021 (1 LPM)



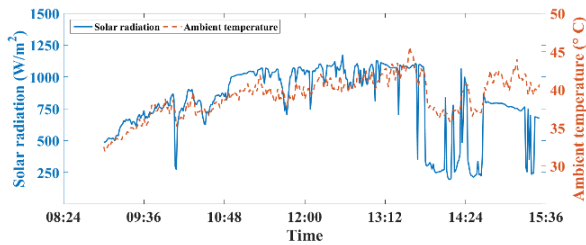
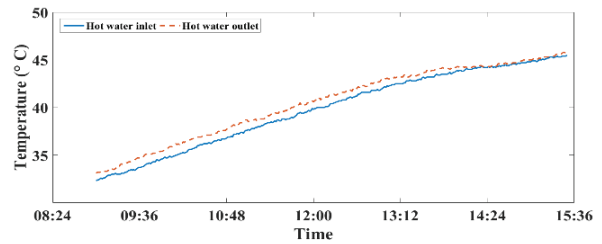
(b) 25 August 2021 (1 LPM)



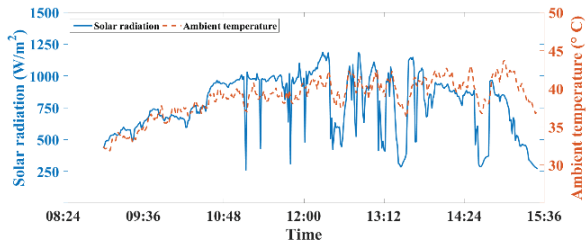
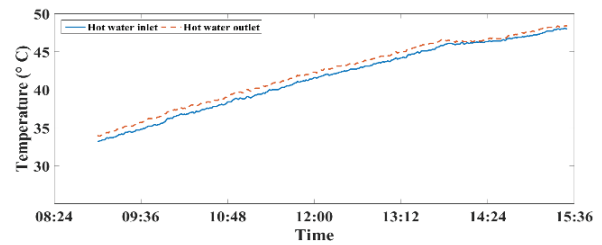
(c) 19 August 2021 (2 LPM)



(d) 20 August 2021 (2 LPM)



(e) 23 August 2021 (3 LPM)



(f) 24 August 2021 (3 LPM)

Figure 6 Solar radiation (W/m^2), ambient temperature ($^{\circ}C$), and hot water temperature ($^{\circ}C$) when the solar water heating system (SWHS) without CPC reflectors

Table 2 Initial temperature, final temperature, thermal energy, and efficiency of the systems (with CPC reflectors and galvanized sheet are used)

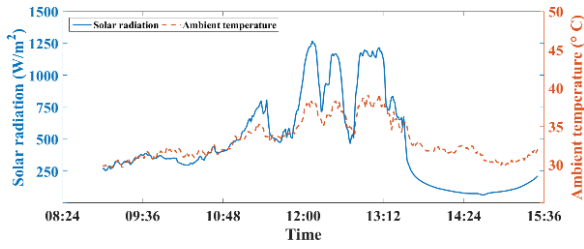
Date	Flow	T _{Initial}	T _{Final}	I _T	Q _{Coil}	Eff _{th}
	(LPM)	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(kJ)	(%)
2-Sep-2021	1	31.80	42.20	462.94	4,347.20	18.24
3-Sep-2021	1	29.93	43.80	581.70	5,796.27	19.36
Average		30.87	43.00	522.32	5,071.74	18.80
6-Sep-2021	2	29.63	43.70	592.37	5,879.87	19.28
7-Sep-2021	2	30.23	43.60	668.90	5,587.27	16.23
Average		29.93	43.65	630.64	5,733.57	17.76
11-Sep-2021	3	29.50	40.90	633.61	4,765.20	14.61
18-Sep-2021	3	30.00	45.70	843.53	6,562.50	15.11
Average		29.75	43.30	738.57	5,663.85	14.86

3. กรณี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อน ที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ทำจากแผ่นสแตนเลส

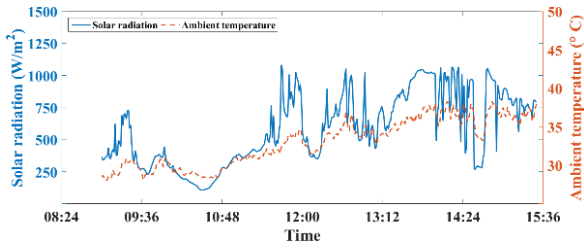
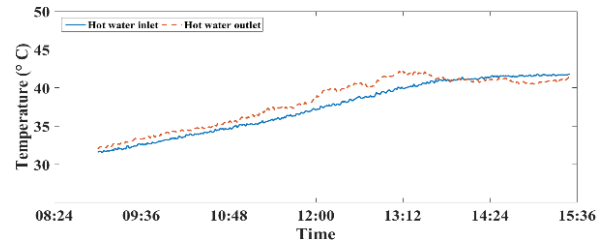
ผลการศึกษาแสดงดัง Table 3 และ Figure 8 พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 13.97 รองลงมา คือ ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน 2 และ 3 LPM จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 13.81 และ 13.49 ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 1 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 32.25 °C ไปเป็น 47.55 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 6,395.40 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 889.31 W/m² ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 2 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 32.35 °C ไปเป็น 46.75 °C หรือคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 6,019.20 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 847.88 W/m² และที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 3 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยเริ่มต้น 33.14 °C ไปเป็น 40.05 °C หรือคิดเป็นพลังงาน

ความร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ 5,378.27 kJ เมื่อได้รับปริมาณรังสีอาทิตย์ 774.44 W/m²

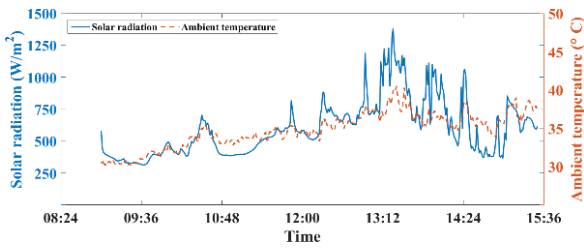
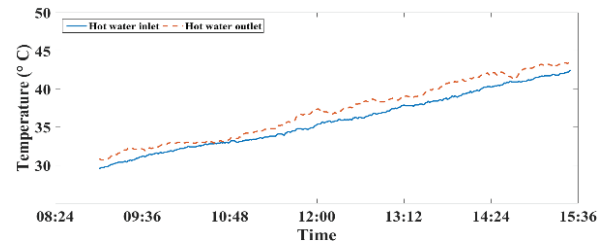
พิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษานี้เมื่อมีการติดตั้งและไม่ติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบต่ำสุด 1 LPM จะทำให้ระบบผลิตน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบต่ำจะช่วยให้ของไหลทำงานในระบบ (น้ำ) มีโอกาสที่จะรับความร้อนที่ถูกถ่ายเทจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้สูงกว่ากรณีที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบมีอัตราการไหลที่สูง (เช่น จากสมการหาอัตราความร้อน $\dot{Q} = \dot{m}_w c_p (T_{out} - T_{in})$ เมื่อกำหนดให้ $\dot{Q} = 1 \text{ kW}$, $c_p = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ และ $T_{in} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่ออัตราการไหลมีความแตกต่างกัน 2 อัตราการไหล คือ $\dot{m}_w = 1 \text{ LPM}$ และ $\dot{m}_w = 3 \text{ LPM}$ จากนั้นหาอุณหภูมิน้ำออก (T_{out}) เมื่ออัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน 2 อัตราการไหล จากสมการ $T_{out} = T_{in} + (\dot{Q} / \dot{m}_w c_p)$ ที่ได้จากสมการข้างต้น พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำ 1 LPM และ 3 LPM อุณหภูมิน้ำออก (T_{out}) จะมีค่าเท่ากับ 49.35 °C และ 39.78 °C ตามลำดับ)



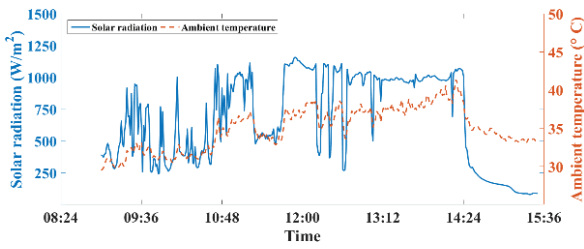
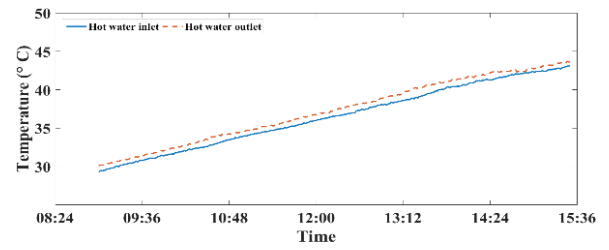
(a) 2 September 2021 (1 LPM)



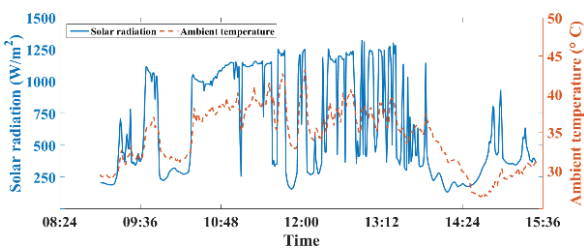
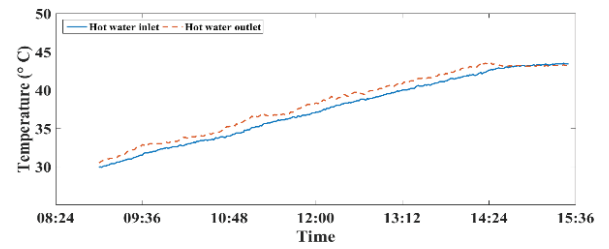
(b) 3 September 2021 (1 LPM)



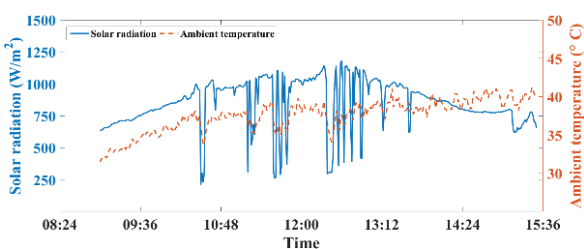
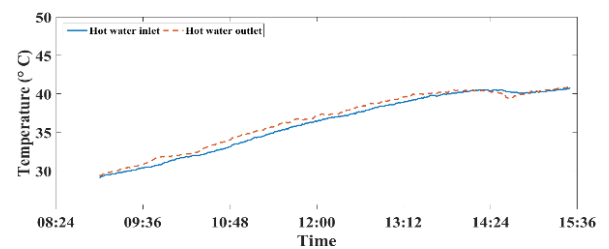
(c) 6 September 2021 (2 LPM)



(d) 7 September 2021 (2 LPM)



(e) 11 September 2021 (3 LPM)



(f) 18 September 2021 (3 LPM)

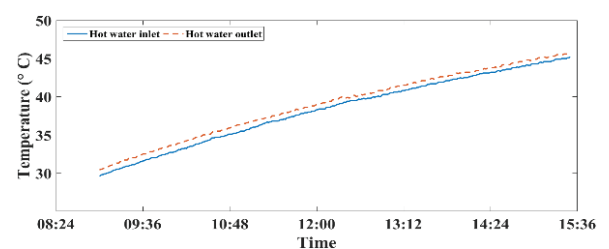
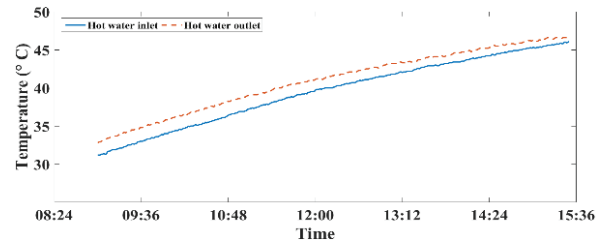
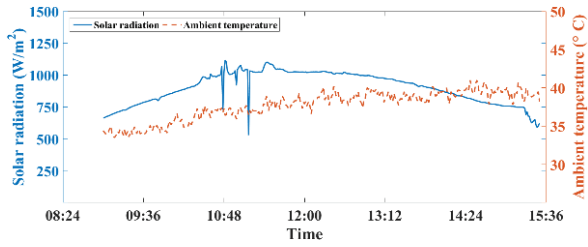
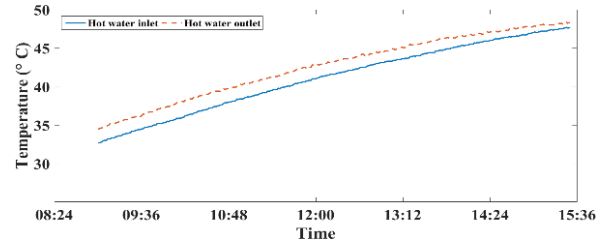
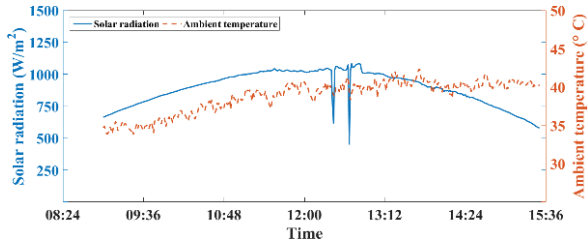


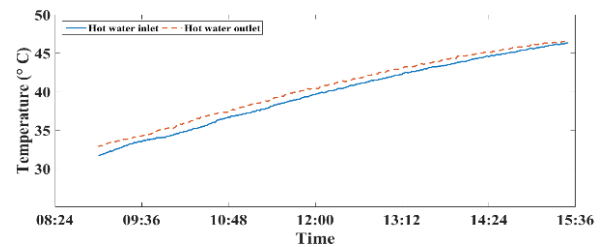
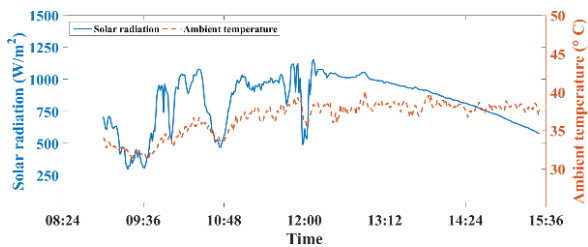
Figure 7 Solar radiation (W/m²), ambient temperature (°C), and hot water temperature (°C) when the solar water heating system (SWHS) with CPC reflectors (galvanized sheet are used)



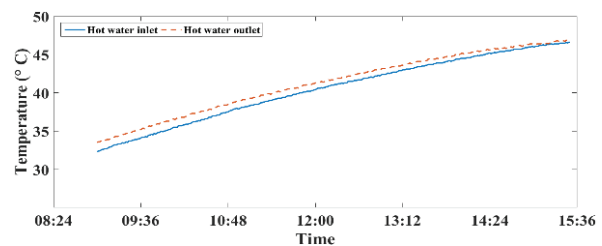
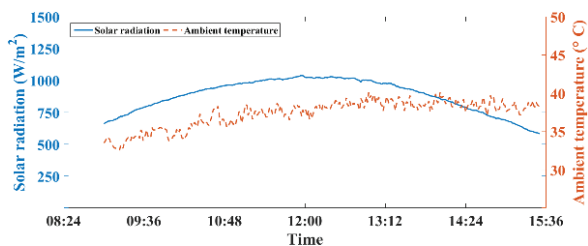
(a) 29 September 2021 (1 LPM)



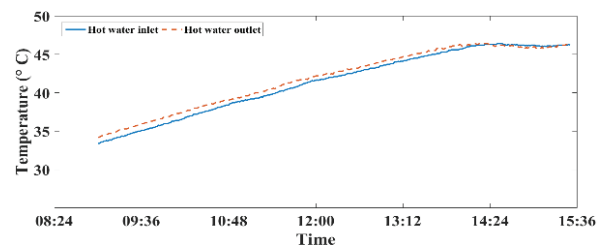
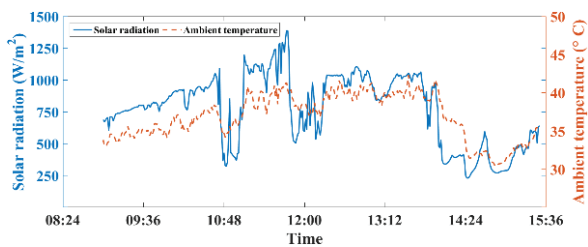
(b) 30 September 2021 (1 LPM)



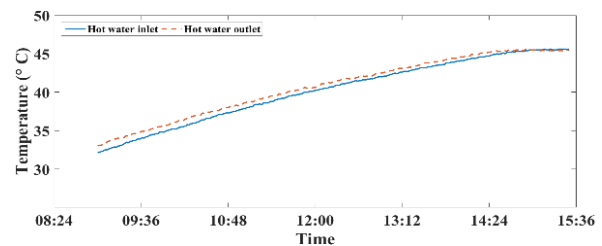
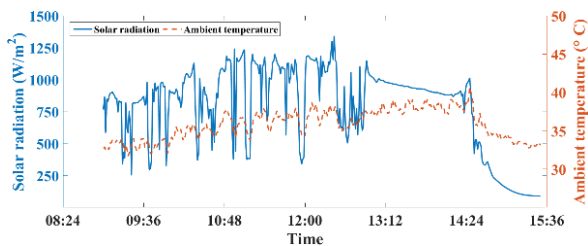
(c) 4 October (2 LPM)



(d) 5 October 2021 (2 LPM)



(e) 6 October 2021 (3 LPM)



(f) 10 October 2021 (3 LPM)

Figure 8 Solar radiation (W/m²), ambient temperature (°C), and hot water temperature (°C) when the solar water heating system (SWHS) with CPC reflectors (stainless sheet are used)

Table 3 Initial temperature, final temperature, thermal energy, and efficiency of the systems (with CPC reflectors and stainless sheet are used)

Date	Flow	T _{Initial}	T _{Final}	I _T	Q _{Coil}	Eff _{th}
	(LPM)	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(kJ)	(%)
29-Sep-2021	1	31.43	46.70	893.76	6,381.47	13.87
30-Sep-2021	1	33.07	48.40	884.86	6,409.33	14.07
Average		32.25	47.55	889.31	6,395.40	13.97
4-Oct-2021	2	32.00	46.60	822.68	6,102.80	14.41
5-Oct-2021	2	32.70	46.90	873.08	5,935.60	13.21
Average		32.35	46.75	847.88	6,019.20	13.81
6-Oct-2021	3	33.77	34.50	763.94	5,280.73	13.43
7-Oct-2021	3	32.50	45.60	784.93	5,475.80	13.55
Average		33.14	40.05	774.44	5,378.27	13.49

โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูป ประกอบพาราโบล่าที่ทำจากวัสดุสังกะสีจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ โดยจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 19.36 ซึ่งระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นจาก 29.93 °C ไปเป็นอุณหภูมิน้ำสุดท้าย 43.80 °C คิดเป็นพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้ 5,796.27 kJ เมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับเท่ากับ 581.70 W/m² (ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 7 (b))

แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงอุณหภูมิน้ำสุดท้ายที่สูงที่สุด พบว่า กรณีเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูป ประกอบพาราโบล่าที่ทำจากวัสดุสแตนเลสจะมีความเหมาะสมที่สุด (เนื่องจากสแตนเลสเป็นวัสดุที่มีความมันวาว ส่งผลให้มีคุณสมบัติการสะท้อนของแสงที่ดีกว่าวัสดุที่เป็นแผ่นสังกะสี) โดยเมื่อกำหนดให้อัตราการไหลเวียนของน้ำในระบบมีอัตราการไหล 1 LPM ระบบจะสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นจาก 33.07 °C ไปเป็นอุณหภูมิน้ำสุดท้าย 48.40 °C เมื่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ได้รับเท่ากับ 884.86 W/m² และระบบจะสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 6,409.33 kJ (แสดงดัง Table 3 และ Figure 8 (b))

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงาน

แสงอาทิตย์ที่มีการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน โดยการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบล่า โดยในการศึกษาหลอดแก้วสุญญากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 33.80 mm และ 47.20 mm ที่มีความยาว 1,836 mm จำนวน 8 ท่อ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ และในส่วนของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์นั้นในการทดสอบได้ดำเนินการออกแบบและสร้างแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากวัสดุต่างกัน 2 วัสดุ คือ แผ่นสังกะสี และแผ่นสแตนเลส ที่มีความสูงของรางสะท้อนเท่ากับ 86.80 mm

ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และความสามารถในการเพิ่มคุณภาพความร้อน (อุณหภูมิน้ำร้อน) พบว่า ระบบเมื่อมีการติดตั้งแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบล่าจะช่วยให้คุณภาพพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้สูงขึ้น (อัตราความร้อนที่ระบบผลิตได้และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ระบบผลิตได้สูงขึ้น) ที่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนในระบบมีค่าต่ำจะช่วยให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าสูงที่สุด และเมื่อเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานร่วมกับแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบล่าที่ทำจากแผ่นสังกะสีจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคุณภาพความร้อน (อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ระบบผลิตได้) จะได้ว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบล่าที่ทำจากแผ่นสแตนเลสจะส่งผลให้ระบบสามารถผลิตอุณหภูมิน้ำร้อนได้สูงที่สุด เนื่องมาจากลักษณะของพื้นผิวที่มีความมันวาว ส่งผล

ให้รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผ่นสะท้อนสามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังตัวรับรังสีอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

ทั้งนี้ในอนาคตผู้ดำเนินงานวิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความสูงของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เห็นถึงความแตกต่างและรวมถึงความสามารถของแผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่จะส่งผลต่อการทำงานของระบบ อีกทั้งจะต้องมีการพิจารณาในส่วนของการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะช่วยให้เกิดการตัดสินใจนำมาใช้งานต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประเภททุนพัฒนางานวิจัยเพื่อสร้างความมั่นคงเศรษฐกิจฐานราก ประจำปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560).

โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย (ปี 2560) (pp. 6).

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563).

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 - 2580 (AEDP2018) (pp. 43).

สรวิศ สอนสารี. (2562). ผลของความสูงและวัสดุของ แผ่นสะท้อนรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่มีผลต่อการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 9(3), 168-183.

Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Sonsaree, S. and Sirisamphanwong, C. (2014). Thermal performance testing of heat pipe evacuated tube with compound parabolic concentrating solar collector by ISO 9806-1. *Energy Procedia*, 56, 237-246.

Duffie, J.A. & Beckman, W.A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.

Gao, C. & Chen, F. (2020). Model building and optical performance analysis on a novel designed compound parabolic concentrator. *Energy conversion and management*, 209, 112619.

Jiang, C., Yu, L., Yang, S., Li, K., Wang, J., & Lund, P.D. (2020). A review of the compound parabolic concentrator (CPC) with a tubular absorber. *Energies*, 13(3), 695.

Li, L., Wang, B., Pye, J. & Lipiński, W. (2020). Temperature-based optical design, optimization and economics of solar polar-field central receiver systems with an optional compound parabolic concentrator. *Solar energy*, 206, 1018-1032.

Mgbemene, C.A, Duffy, J., Sun, H. & Onyegegbu, S.O. (2010). Electricity generation from a compound parabolic concentrator coupled to a thermoelectric module. *Energy Sustainability*, 43208, 423-432.

Pranesh, V., Velraj, R., Christopher, S. & Kumaresan, V. (2019). A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications. *Solar energy*, 187, 293-340.

Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguirre, H. & Tanaka, K. (2018). A small-scale solar Organic Rankine Cycle power plant in Thailand: Three types of non-concentrating solar collectors. *Solar energy*, 162, 541-560.

Thawongamyingsakul, C. & Kiatsiriroat, T. (2012). Potential of a solar organic rankine cycle with evacuated-tube solar collectors as heat source for power generation in Thailand. *Energy Science and Technology*, 4(2), 25-35.

Tian, M., Su, Y., Zheng, H., Pei, G., Li, G. & Riffat, S. (2018). A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 1272-1296.

Vijayakumar, P., Kumaresan, G., Faizal, U M., Chandran, GR V. & Adharsh, KS V. (2019). *Performance evaluation of compound parabolic concentrator with evacuated tube heat pipe*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Wu, Z., Wang, X., Sha, L., Li, X., Yang, X., & Ma, X. (2021). Performance analysis and multi-objective optimization of the high-temperature cascade heat pump system. *Energy*, 223, 120097.

Xia, E. & Chen, F. (2020). Analyzing thermal properties of solar evacuated tube arrays coupled with mini-compound parabolic concentrator. *Renewable energy*, 153, 155-167.

การตั้งสูตรตำรับเจลจากสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดสำหรับสิวอักเสบ

Gel formulation from bark of *Tinospora crispa* (L.) Miers ex Hook. F. & Thomson extract for inflammatory acne

แสงเพ็ญ อินประเสริฐ¹, พิทักษ์ แซ่เฮ้ง¹, เพชรพงศ์ เพชรศรี², พิรุณรัตน์ เดชบำรุง², กฤษดา อนันตวุฒิกุล², นวลศรี นีวัตติ์วงศ์³, อารีรัตน์ ชื่อดี²

Saengpen Inprasert¹, Pithak Saeheng¹, Petchpong Petcharee², Piroonrat Dechbumroong², Kridsada Anuntawuttikul², Nuansri Niwattisaiwong³, Areerat Suedee²

Received: 24 November 2021 ; Revised: 7 January 2021 ; Accepted: 1 February 2022

บทคัดย่อ

บอระเพ็ดเป็นสมุนไพรที่มีการใช้มาอย่างยาวนานและมีการศึกษาพบว่าสารสำคัญจากส่วนลำต้นที่สามารถลดอาการของการอักเสบได้ การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทดสอบเปรียบเทียบวิธีการสกัดด้วยการหมักกับการสกัดแบบซอกซ์เล็ตด้วยตัวทำละลาย 95% เอทานอลจากเปลือกบอระเพ็ดและการพัฒนาสูตรตำรับเจลจากเปลือกบอระเพ็ดสำหรับสิวอักเสบ การวิเคราะห์สารสกัดบอระเพ็ดด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 292 และ 319 นาโนเมตร จากนั้นนำสารสกัดไปพัฒนาต่อเป็นสูตรตำรับเจลร่วมกับการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและการทดสอบความคงตัวด้วยวิธี freeze thaw cycle จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดด้วยวิธีการหมักและวิธีการสกัดแบบซอกซ์เล็ตมีร้อยละของสารสกัด (โดยน้ำหนัก) เท่ากับ 18.81 และ 11.05 ซึ่งแตกต่างกัน 7.76 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ดด้วยวิธีการหมักแล้วนำสารสกัดไปตั้งสูตรตำรับเจลที่มีความเข้มข้นของสารสกัดบอระเพ็ด 5% เพื่อไปทดสอบความคงตัวด้านต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่าสูตรตำรับเจลจากสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดทั้งที่ 0.5% และ 1% Carbopol® 940 มีความคงตัวทั้งสองสูตรตำรับ

คำสำคัญ: บอระเพ็ด สูตรตำรับเจล สิวอักเสบ

Abstract

Tinospora crispa (L.) Miers ex Hook. f. & Thomson has been widely used for a long time. The study showed that active ingredients from stem of *T. crispa* contain anti-inflammatory activity. The purpose of this quantitative research was to compare maceration and soxhlet extraction methods in the extraction of bark from *T. crispa* with 95% ethanol and to develop gel formulation with *T. crispa* ethanolic extract for inflammatory acne. The extract was analyzed by UV-VIS spectrophotometer at wavelength 292 and 319 nanometer. Then, the extract was developed into gel formulations which were determined physical properties, chemical properties and stability tests by freeze thaw cycles. The results showed that the *T. crispa* extract with maceration method and soxhlet extraction method had %yield (w/w) 18.81 and 11.05, respectively. The difference of %yield was 7.76. Therefore, the researcher used the bark *T. crispa* extract by maceration method to prepare gel formulation with 5% crude extract of *T. crispa* which were conducted stability tests. The results presented the stability of both gel formulations from *T. crispa* extract with 0.5% and 1% Carbopol® 940.

Keywords: *Tinospora crispa*, gel formulation, inflammatory acne

¹ นักศึกษาปริญญาตรี, คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² อาจารย์, คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

³ รองศาสตราจารย์, คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย อำเภอชัยบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Bachelor degree student, School of Pharmacy, Eastern Asia University, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110, Thailand.

² Lecturer, School of pharmacy, Eastern Asia University, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110, Thailand.

³ Associate Professor, School of Pharmacy, Eastern Asia University, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110, Thailand.

* Corresponding author; Areerat Suedee, School of Pharmacy, Eastern Asia University, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110, Thailand. areerats@eau.ac.th

บทนำ

การเกิดสิวคือการอักเสบของหน่วยรูขุมและต่อมไขมัน โดยมักเป็นที่บริเวณหน้า คอและลำตัวส่วนบน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีต่อมไขมันขนาดใหญ่อยู่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดสิว เช่น ยาบางชนิด เครื่องสำอาง และสิ่งแวดล้อม โดยสาเหตุของสิวเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลัก เช่น เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาศัยอยู่ที่ผิวหนังและภายในต่อมรูขุม การเกิดปฏิกิริยาการอักเสบซึ่งเกิดจากเชื้อ *Propionibacterium acnes* การเกิดความผิดปกติในการสร้างเคราตินภายในต่อมรูขุม ต่อมไขมัน และต่อมไขมันสร้าง sebum เพิ่มขึ้น เป็นต้น ในช่วงวัยรุ่น การเกิดสิวมักเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยและเป็นสิ่งรบกวนที่ก่อให้เกิดปัญหาในด้านพัฒนาบุคลิกภาพ ทำให้ขาดความมั่นใจต่อการเข้าสังคมและแสดงออกทางสังคม ซึ่งการรักษาสิวในปัจจุบันมีวิธีการรักษาที่หลากหลาย โดยผู้ป่วยอาจเลือกการเลือกซื้อยาหรือผลิตภัณฑ์เพื่อมารักษาด้วยตนเอง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ซื้ออาจมีสารหรือส่วนประกอบของสารที่เป็นอันตราย หรือมีผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้น เช่น เกิดการระคายเคืองผิว ผื่นคัน ผิวไวต่อแสง การแพ้ยาลูกวัว รวมถึงการดื้อยา (Khunawattanakul et al., 2017) โดยเฉพาะสารประกอบกลุ่มคอร์ติโคสเตียรอยด์ที่ช่วยลดการอักเสบซึ่งหากใช้เป็นระยะเวลาที่ยาวนานอาจทำให้เกิดการฝ่อบางของผิวหนัง หลอดเลือดฝอยบริเวณผิวหนังขยายตัวมากขึ้นและอาจเกิดการกลับมาเป็นซ้ำ การกำเริบใหม่รุนแรงมากยิ่งขึ้นได้ด้วย (Techasatian, 2016) จากสาเหตุต่างๆ ตามที่กล่าวมาจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการนำสมุนไพรมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับลดอาการสิวอักเสบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากสารเคมีและผลข้างเคียงของการใช้ยาปฏิชีวนะ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำสารสกัดจากธรรมชาติหรือการนำสมุนไพรที่มีสรรพคุณด้านการอักเสบเพื่อนำมาพัฒนาในรูปแบบผลิตภัณฑ์โดยการเลือกนำบอระเพ็ดที่มีสรรพคุณทางยา เนื่องจากต้นบอระเพ็ดมีสารสำคัญ *N-trans-Feruloyltyramine* ที่สามารถลดอาการของการอักเสบในร่างกายได้ (Jiang et al., 2015) และมีรายงานการวิจัยพบว่าสารสกัดส่วนของลำต้นบอระเพ็ดมีฤทธิ์ในการต้านการอักเสบ (Hipol et al., 2012) ดังนั้นจึงนำมาพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์ลดสิวอักเสบในรูปแบบเจล ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเจลเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้รวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดความมันบนใบหน้า โดยสามารถเตรียมผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะที่นำใช้ สามารถล้างหรือทำความสะอาดออกได้ง่ายอีกด้วย

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของต้นบอระเพ็ด

บอระเพ็ดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Tinospora crispa* (L.) Miens ex Hook. f. & Thomson พบอยู่ในวงศ์ Menispermaceae มีลักษณะเป็นไม้เถา เนื้อแข็ง ไม่มีขน เลื้อย

ยาวได้ถึง 15 เมตร มีตุ่มนูนกระจายทั่วทั้งลำต้น ผิวขรุขระไม่เรียบ มีรสขม มีรากอากาศคล้ายเส้นเชือกขนาดเล็กยาวออกบริเวณโคนเถา ใบเป็นใบเดี่ยวคล้ายรูปหัวใจ โคนใบหยักว่ามีเส้นใบหลัก ออกจากโคนใบประมาณ 3-5 เส้น ดอกบอระเพ็ดออกเป็นช่อขึ้นตามซอกใบมีขนาดเล็กสีเหลืองอมเขียว ตรงกลางประกอบด้วยกลีบและเกสร ผลมีลักษณะเป็นรูปไข่กลมรี สีเหลืองถึงส้มแดง (Homhual, 2010)

ในตำรายาไทย เถา มีรสขม แก้ไข้ทุกชนิด เป็นยาขมเจริญอาหาร ต้มดื่มเพื่อให้เจริญอาหาร ช่วยย่อย บำรุงน้ำดี บำรุงไฟธาตุ แก้อาการระคายเคืองอาหาร บำรุงร่างกาย เป็นยาขับเหงื่อ ดับกระหาย แก้อ่อนใน ลดน้ำตาลในเลือด แก้ท้องเสีย ไข้จับสั่น ระบายความร้อน ทำให้ตัวและเลือดเย็น ทุกส่วนของพืชใช้แก้ไข้ เป็นยาบำรุง โดยจัดอยู่ใน "พิภดตรีฎาณรส" คือการจำกัดจำนวนตัวยาที่ทำให้รื้อรสอาหาร 3 อย่างคือ ไล่หมากรากสะเตา เถาบอระเพ็ด มีสรรพคุณแก้ไข้ ดับพิษร้อน ขับปัสสาวะ ขับเสมหะ บำรุงไฟธาตุ บำรุงกำลัง "พิภดยาแก้ไข้ 5 ชนิด" คือการจำกัดจำนวนตัวยาแก้ไข้ 5 อย่างคือ รากย่านาง รากคนทา รากชิงชี ขี้เหล็กทั้ง 5 และเถาบอระเพ็ด สรรพคุณแก้ไข้ ดับพิษร้อน (Kongsaktrakoon et al., 1994; Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health, Thailand, 1998; Homhual, 2010; Smitinand, 2010) โดยบอระเพ็ดเป็นสมุนไพรที่มีการใช้มาอย่างยาวนาน

จากการศึกษาวิจัยพบว่าบอระเพ็ดมีสรรพคุณทางยาหลายประการ เช่น ฤทธิ์ทางระบบภูมิคุ้มกัน (Ibahim et al., 2011) ฤทธิ์ต้านเซลล์มะเร็ง (Abood et al., 2014) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Zulkefli et al., 2013) ฤทธิ์การลดระดับน้ำตาลในเลือด (Noor et al., 1989; Sriyapai, et al., 2009) ฤทธิ์ในการต้านการอักเสบ (Higashino et al., 1992) ในส่วนของการทดสอบฤทธิ์ต้านการอักเสบด้วยวิธี Carrageenan-induced rat paw edema โดยการใช้สารสกัดน้ำจากส่วนของลำต้นบอระเพ็ดที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 150 mg/kg ซึ่งสามารถยับยั้งการบวมของอุ้งเท้าหนูได้และพบว่าสารสกัดบอระเพ็ดที่ความเข้มข้น 5 และ 7.5% w/v นั้นทำให้เกิดความคงตัวของเยื่อหุ้มเซลล์และการไปยับยั้งการเสื่อมสภาพของโปรตีนจึงน่าจะเป็นกลไกที่เป็นไปได้ในการต้านการอักเสบของบอระเพ็ด (Hipol et al., 2012) โดยบอระเพ็ดมีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลาย ได้แก่ Alkaloids, Flavonoids, Flavone glycosides, Triterpenes, Diterpenes, Diterpene glycosides, cis Clerodane-type furanoditerpenoids, Lactones, Sterols, Lignans และ Nucleosides (Ahmad et al., 2016) ยกตัวอย่างเช่น Picoretin, Columbin, Picoretroside, Tinosporide, Tinosporidine เป็นสารที่ทำให้บอระเพ็ดมีรสขม, *N-trans-feruloyltyramine* (1) ซึ่งเป็นสารที่สามารถลดอาการของการอักเสบ (Jiang et al.,

2015) และเป็นสารหลักที่พบที่อยู่ในกลุ่ม Alkaloid (Koay & Amir, 2013; Ahmad *et al.*, 2016), สารในกลุ่ม Flavonoids เช่น Apigenin (2) สามารถลดการหลั่ง interleukin-6 (IL-6), tumor necrosis factor alpha (TNF- α) ซึ่งเป็นไซโตไคน์ที่เกี่ยวข้องกับการอักเสบ และลดระดับเอนไซม์ cyclooxygenase (COX-2) ที่มักพบได้เมื่อร่างกายเกิดการอักเสบ (Park, *et al.*, 2020), สาร Diosmetin (3) (Monika *et al.*, 2010; Ahmad *et al.*, 2016), Columbin (4) และ Rumphiol E (5) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มของ Furanoditerpenoids (Agnihortri *et al.*, 2010) เป็นกลุ่ม Terpenoids เช่น Borapetoside A, Borapetoside B, Borapetol A, Tinocrisposide, Tinosporan พบว่าสาร

Diosmetin และ 3-O-b-D-Glucopyranosyl-b-sitosterol (6) สามารถยับยั้งการสร้างสาร nitric oxide ได้ (Yang & An, 2014; Kim *et al.*, 2018), โดยสาร Cycloeucaenol (7) มีฤทธิ์ป้องกันตัวอักเสบ (Ismail & Choudhary, 2016) รวมถึงกลุ่มฟีนอลิกไกลโคไซด์ เช่น Tinoluberide เป็นต้น โดยเป็นสารที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบ (Mokkhasmit *et al.*, 1971; Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health, Thailand, 1998; Sharma *et al.*, 2019) ซึ่งบอระเพ็ดเป็นพืชที่มีราคาไม่สูงมาก อีกทั้งบอระเพ็ดยังมีราคาไม่แพง สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดและสามารถปลูกได้ตลอดทุกฤดูกาล

องค์ประกอบทางเคมีที่พบในบอระเพ็ด

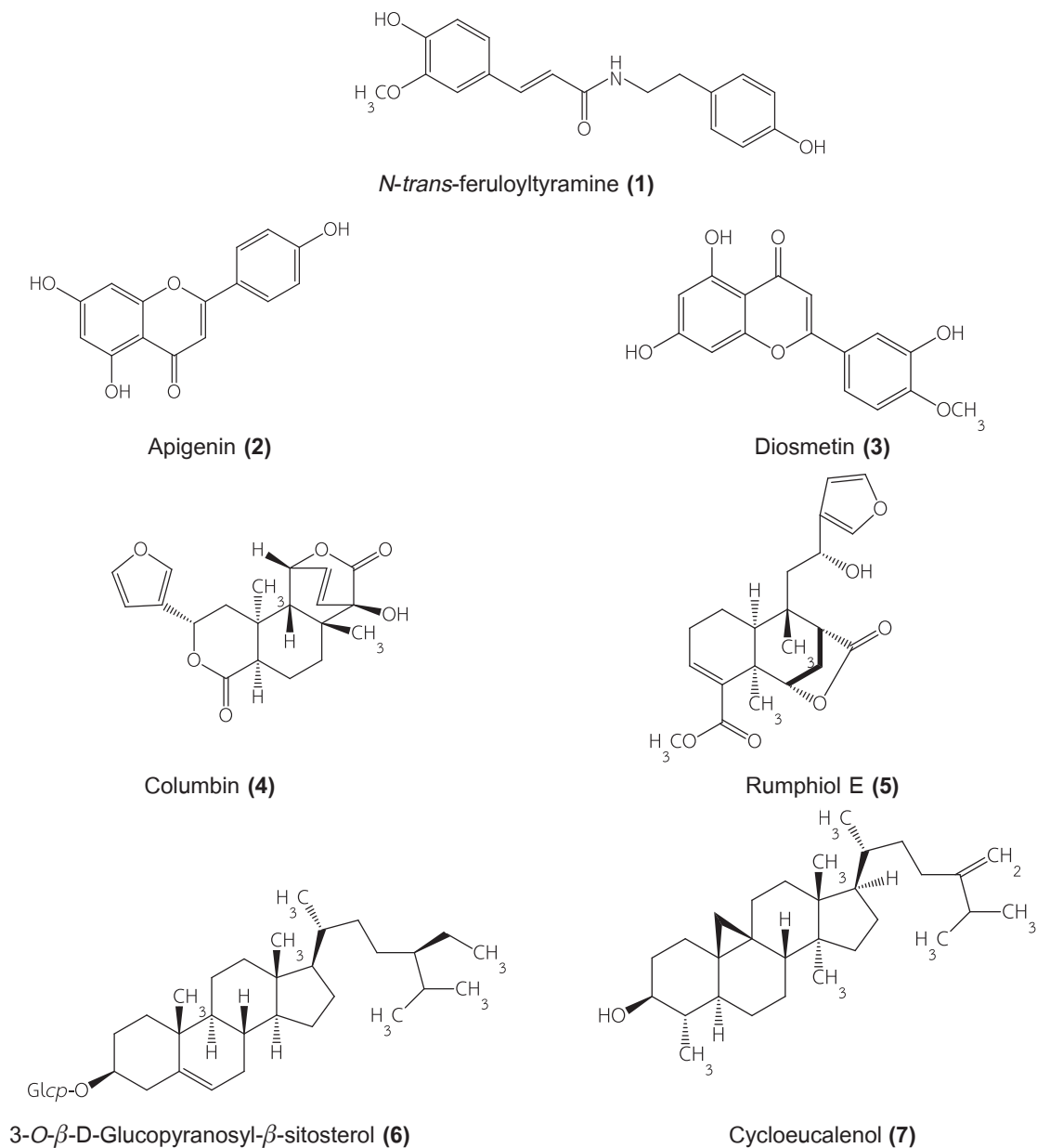


Figure 1 Chemical constituents of *Tinospora crispa*

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการสกัดเปลือกบอระเพ็ดโดยวิธี Maceration extraction และวิธี Soxhlet extraction
2. เพื่อนำสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดที่ได้ไปพัฒนาต่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ลดสิวอักเสบในรูปแบบเจล

แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในด้านของกลไกการเกิดสิวมักเกิดจากต่อมไขมัน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตไขมันและมีท่อเปิดออกสู่อวัยวะผิวหนังเพื่อให้ไขมันที่ผลิตขึ้นจากต่อมไขมันออกมาหล่อลื่นผิวหนังภายนอก ต่อมาไขมันที่แต่ละตำแหน่งของร่างกายมีขนาดและความหนาแน่นไม่เท่ากัน บริเวณใบหน้าจะมีต่อมไขมันขนาดใหญ่ และหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น (Do et al., 2009; Udompataikul, 2018; Ali et al., 2019) ดังนั้นเราจึงพบสิบบริเวณใบหน้าได้บ่อย ตำแหน่งอื่นๆ ที่พบสิบบ่อย ได้แก่ บริเวณหลัง หน้าอกและไหล่

กลไกการเกิดสิวจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (Techasatian, 2016; Udompataikul, 2018) ดังนี้ คือ

1) ต่อมไขมันสร้าง sebum เพิ่มมากขึ้น

ไขมันที่สร้างโดยต่อมไขมันจะมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเป็นสิวและผื่น การสร้างไขมันโดยต่อมไขมันจะเกิดขึ้นโดยการกระตุ้นของฮอร์โมนแอนโดรเจนซึ่งจะเพิ่มขึ้นในช่วงวัยรุ่น ดังนั้นจึงเริ่มพบสิบบริเวณวัยรุ่น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของระบบฮอร์โมนในร่างกาย

2) ความผิดปกติของ Follicular keratinization

เกิดความผิดปกติของการแบ่งตัวของเซลล์ผิวหนัง และมีการสร้าง Keratin บริเวณรูขุมขนผิดปกติ ทำให้เกิดการอุดตันของเซลล์ผิวหนังขึ้น

3) แบคทีเรีย *Propionibacterium acnes*

เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในรูขุมขน ในระยะแรกจะเริ่มเกิดสิวมักจะตรวจไม่พบเชื้อ แต่ในระยะที่พบการอักเสบจะตรวจพบแบคทีเรียชนิดนี้เป็นจำนวนมาก แบคทีเรียชนิดนี้จะกระตุ้นเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดคือ Monocyte และ Neutrophil ให้หลั่ง Inflammatory Mediator ต่างๆ มากมาย เช่น IL-12, IL-8, และ TNF เป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดการอักเสบขึ้น

4) การเกิดปฏิกิริยาอักเสบ (Inflammation)

เป็นปฏิกิริยาที่ตอบสนองของเซลล์ เนื้อเยื่อหรือเนื้อเยื่อที่ตายแล้ว ซึ่งมักจะมีลักษณะอาการทางคลินิกคือปวด บวม แดงและร้อน เมื่อเข้าสู่วัยรุ่นฮอร์โมนแอนโดรเจน ซึ่งสร้างจาก Adrenal Gland และ Gonad จะกระตุ้นให้ต่อมไขมันมี

ขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเซลล์ของต่อมขนมีการสร้างมากผิดปกติ จะทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณทางออกของรูขุมขนส่งผลให้ไขมัน เซลล์ผิวหนังที่หลุดลอกหรือตายแล้ว และแบคทีเรียที่เกิดการอุดตันไม่สามารถระบายเกิดเป็น Comedone ซึ่งถือเป็นต้นกำเนิดของสิว เมื่อต่อมไขมันมีการผลิตไขมันมากเกินไปจะทำให้เกิดการสะสมใน Sebaceous Follicle มาก Comedone จะขยายขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการอักเสบที่บริเวณ Sebaceous follicle แบคทีเรีย *Propionibacterium acnes* เป็น Anaerobic, Gram-positive Diptheroids และ Colonize อยู่ในรูขุมขน จะมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อเกิดการอักเสบและจะเกิดกระบวนการกระตุ้น Neutrophil ให้เกิดการหลั่ง Lysosome ทำให้เกิดการอักเสบรอบ Sebaceous follicle อีกทั้งยังทำหน้าที่ สร้าง Enzyme lipase ย่อย Triglycerides ในต่อมไขมันให้เป็น Free fatty acid ซึ่งทำให้เกิดการอักเสบของต่อมไขมัน ถ้าการอักเสบอยู่ส่วนต้นของผิวหนัง ก็จะเป็นตุ่มแดง (Papule) หรือตุ่มหนอง (Pustule) แต่ถ้าอยู่ลึกลงไปจะเป็นก้อนบวม (Nodule) หรือ ถุงสิว (Cyst)

จากขั้นตอนที่กล่าวมาการอักเสบจะเกิดจากเมื่อเชื้อแบคทีเรีย *Propionibacterium acnes* มีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นจะกระตุ้น Macrophages ให้เคลื่อนที่มายังบริเวณที่เกิดการอักเสบ เกิดกระบวนการ Phagocytosis เกิดการรวมตัวของเชื้อแบคทีเรียและ Membrane กระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยของ Proinflammatory enzyme เมื่อ Macrophages, Neutrophils และ Dendritic cell กลืนกินแบคทีเรียแล้ว จะมีการปล่อยโปรตีนของผนังเซลล์แบคทีเรียบางส่วนออกมา ซึ่งโปรตีนเหล่านี้สามารถเหนี่ยวนำและกระตุ้นเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกันให้ตอบสนองทำให้เกิดการอักเสบด้วยการหลั่ง Chemical mediators เพิ่มขึ้นอีกด้วย เช่น Histamine, Nitric oxide (NO), Prostaglandins E2 (PGE2) และ Leukotrienes เป็นต้น (Wetwitayaklung, 2012) ดังนั้นจากที่กล่าวมาการทำให้เกิดความคงตัวของเยื่อหุ้มเซลล์และการไปยับยั้งการเสื่อมสภาพของโปรตีนจึงน่าจะเป็นกลไกในการต้านการอักเสบของบอระเพ็ด (Hipol et al., 2012)

กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้มีขอบเขตครอบคลุมเนื้อหาในเรื่องของการสกัดสารสำคัญจากบอระเพ็ดด้วยตัวทำละลาย 95% Ethanol และการศึกษาการตั้งสูตรตำรับเจลบอระเพ็ดเพื่อให้ได้สูตรตำรับที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับผิวหนัง โดยมีการทดสอบความคงตัวโดยใช้วิธีการ Freeze thaw cycle และมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดผลด้านความคงตัว ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ และค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

สมมติฐานการวิจัย

ในการตั้งสูตรตำรับเจลที่มีสารสกัดบอระเพ็ดสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับสิวอักเสบได้

วิธีการวิจัย

การทดลองที่ 1 การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการสกัดเปลือกบอระเพ็ดด้วยวิธี Maceration extraction และวิธี Soxhlet extraction โดยทำซ้ำ 3 รอบ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการสกัด (Extraction)

1.1 ชั่งเปลือกของบอระเพ็ดอย่างละ 100 g ใส่ Erlenmeyer flask แล้วทำการสกัดด้วยวิธี Maceration extraction และ 100 g สำหรับการสกัดด้วยวิธี Soxhlet extraction โดยใช้ 95% Ethanol เป็นตัวทำละลายในการสกัด

1.2 สำหรับวิธี Maceration extraction ให้หมักและหมั่นเขย่าสารสกัดบ่อยๆ จนครบ 5 วัน แล้วจึงกรอง ส่วนวิธีการ Soxhlet extraction โดยทำซ้ำ 3 รอบ เมื่อสกัดเสร็จแล้วจึงทำการกรอง

1.3 นำสารสกัดที่กรองได้มาทำให้เข้มข้นด้วยเครื่อง Rotary evaporator

1.4 ทำสารสกัดแห้งและนำในแต่ละส่วนที่ได้มาคำนวณและเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดที่ได้โดยหา % yield ระหว่าง ส่วนของเปลือกของบอระเพ็ด ด้วยวิธีการสกัดแบบ Maceration extraction และ Soxhlet extraction

2. ขั้นตอนการหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Spectrophotometer

2.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดเพื่อเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญที่พบในสารสกัดโดยวิธีการกราฟมาตรฐาน

2.1.1 นำสารสกัดบอระเพ็ดส่วนเปลือกมาเจือจางกับ 95% Ethanol โดยนำมาหาค่า Absorbance ที่เหมาะสม

2.1.2 นำสารสกัดมาวิเคราะห์ โดยใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer

2.1.3 จดบันทึกค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่น 292 และ 319 nm

2.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความคงตัวของสารสกัดในสูตรตำรับ

2.2.1 เตรียม Stock Solution โดยนำสารสกัดบอระเพ็ดมาผสมกับ 95% Ethanol ในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไป Sonicate จากนั้นเปิดมา 5 mL เจือจางกับ 95% Ethanol จนมีปริมาตรครบ 50 mL จะได้ Stock Solution ที่มีความเข้มข้น 1 mg/mL แล้วนำมาเจือจางเพื่อเตรียมเป็นความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ คือ 0.20, 0.25, 0.30, 0.35 และ 0.40 mg/mL ตามลำดับ

2.2.2 นำสารสกัดแต่ละความเข้มข้นมาวิเคราะห์ โดยใช้เครื่อง UV Spectrophotometer

2.2.3 บันทึกผลค่า Absorbance ทำซ้ำ 3 รอบในทุกๆ ความเข้มข้น

2.2.4 นำค่าที่ได้มาทำเป็น Standard Curve เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความคงตัวของสารสกัดในสูตรตำรับ

การทดลองที่ 2 การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากบอระเพ็ดด้วยการทำ Working Formula of gel base โดยการเปรียบเทียบ % Carbopol® 940 ที่ 0.5%, 1%, 1.5% และ 2.0% ตามลำดับ เพื่อหาปริมาณสารก่อเจลที่เหมาะสม จากนั้นจึงทดสอบหาความคงตัวโดยประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและประเมินคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธี Freeze thaw cycle จำนวน 3 รอบ เพื่อพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์ลดสิวอักเสบในรูปแบบเจลต่อไป โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากบอระเพ็ด

1.1 การเตรียมเจลพื้น (Rowe *et al.*, 2012)

1.1.1 ชั่งสารตาม Working Formula ในสูตรตำรับเจลพื้น

Table 1 Working Formula of gel base

Working Formula	0.5% Carbopol® 940	1.0% Carbopol® 940	1.5% Carbopol® 940	2.0% Carbopol® 940
Carbopol® 940 (g)	0.25	0.50	0.75	1.0
TEA (mL)	0.133	0.300	0.433	0.666
Water add to (g)	50	50	50	50

- 1.1.2 หาปริมาณสารก่อเจลที่มีเหมาะสม
- 1.1.3 นำไปประเมินคุณสมบัติด้านกายภาพและด้านเคมี ได้แก่ และความหนืดและความเป็นกรดต่าง
- 1.2 การเตรียมเจลพื้น
- 1.2.1 ชั่งสารตาม Working formula ในสูตรตำรับ
- 1.2.2 นำ Carbopol® โปริยลงน้ำ ผสมจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.2.3 หยด Triethanolamine (TEA) เพื่อปรับ pH และช่วยให้สารก่อตัวเป็นเจล

- 1.2.4 นำไปประเมินคุณสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ ความเข้ากัน สี กลิ่น ความหนืด และคุณสมบัติด้านเคมี ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง
- 1.2.5 เลือกสูตรเจลพื้นที่เหมาะสมตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดบอระเพ็ดต่อไป
- 1.3 วิธีการตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดบอระเพ็ด
- 1.3.1 ชั่งสารตาม Working Formula ในสูตรตำรับ โดยมีงานวิจัยที่นำสารสกัดจากพืช 1-10% มาตั้งสูตรตำรับเจลที่มีฤทธิ์ต้านอักเสบ (Queiroz *et al.*, 2014) ดังนั้นจึงพิจารณาใช้สารสกัดบอระเพ็ดเป็น 5 % ของสูตรตำรับ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Gel formulation from bark of *Tinospora crispera* extract (Crude extract)

Constituent	Formular 1	Formular 2	Useful
5%Crude extract (g)	2.5	2.5	Active ingredient
Carbopol® 940 (g)	0.25	0.50	Gelling & Thickening agent
TEA (mL)	0.133	0.300	Neutralizer
95% Ethanol (mL)	2.5	2.5	Solvent
Water add to (g)	50	50	Vehicle

- 1.3.2 นำ Carbopol® 940 โปริยลงน้ำ ผสมจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.3.3 เติมสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดที่ละลายด้วย 95% Ethanol ผสมให้เข้ากัน
- 1.3.4 หยด TEA จนกระทั่งก่อตัวเป็นเจล
- 1.3.5 เติม Paraben conc. แล้วบรรจุลงในหลอดสำหรับใส่เจล จากนั้นนำไปทดสอบความคงตัว

2. การทดสอบหาความคงตัว

- 2.1 การประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ
- 2.1.1 ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) จะประเมินด้วยสายตาโดยสังเกตการแยกชั้นหรือการตกตะกอนของเนื้อเจล
- 2.1.2 สี (Color) ประเมินด้วยสายตาโดยการสังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีหรือไม่
- 2.1.3 กลิ่น (Odor) โดยการดมเพื่อประเมินลักษณะของกลิ่นว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร
- 2.1.4 ความใส (Clear) ประเมินด้วยสายตาโดยการสังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความใสหรือไม่
- 2.1.5 ความหนืด โดยวัดความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield RVDV-II+Pro Viscometer

โดยวัดทุกตำรับจำนวน 3 รอบ มีการกำหนดหัวเข็มเบอร์ s52 ซึ่งควบคุมปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการวัดจะกำหนดเป็นอุณหภูมิห้อง ช่วง 25-27°C รอบในการวัดจะกำหนดเป็น 1 RPM ปริมาณของสารที่ใช้ในการวัดกำหนด 0.1 mL ซึ่งค่าความหนืดของสูตรตำรับสมุนไพรเจลจะอยู่ในช่วง 4500-4900 cP (Misal, *et al.*, 2012)

2.2 การประเมินคุณสมบัติทางเคมี

โดยใช้การทดสอบด้วยวิธี Freeze thaw cycle ซึ่งมีการกำหนดการทดสอบคือ ในหนึ่งรอบจะประกอบด้วย อุณหภูมิ 2-8 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง ทั้งหมดจำนวน 3 รอบ (U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, 1998) โดยจะเก็บข้อมูลผลการทดลองดังนี้

- 2.2.1 ความเป็นกรดต่าง จะนำไปวัด pH โดยใช้เครื่อง pH meter โดยวัดทุกตำรับจำนวน 3 รอบ
- 2.2.2 การหาปริมาณสารสกัดในสูตรตำรับ โดยใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer
- 2.2.2.1 เตรียม Stock Solution เจลพื้น โดยชั่ง เจลพื้นปริมาณ 1 g ผสมกับ 95% Ethanol และปรับปริมาตรจนครบ 50 mL จากนั้นปิเปตมา 15 mL เจือจางกับ 95% Ethanol แล้วปรับปริมาตรจนครบ 50 mL

2.2.2.2 เตรียม Stock Solution เจลบอระเพ็ด โดยชั่งเจลบอระเพ็ดปริมาณ 1 g ผสมกับ 95% Ethanol และปรับปริมาตรจนครบ 50 mL จากนั้นบีบเอา 15 mL เจือจางกับ 95% Ethanol แล้วปรับปริมาตรจนครบ 50 mL

2.2.2.3 นำไปวัดที่ความยาวคลื่น 292 และ 319 nm และบันทึกผล Absorbance ทำซ้ำ 3 รอบ

2.2.2.4 นำค่าที่ได้มาเทียบกับ Standard Curve เพื่อประเมินความคงตัวของปริมาณสารสกัดในสูตรตำรับ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

โดยใช้สถิติพื้นฐาน ได้แก่ ร้อยละ (%) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้วิธี One-way Analysis of Variance,

เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference หรือ LSD (Post Hoc Tests) กำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p < 0.05$

ผลการวิจัย

จากการทดลองที่ 1 การศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการสกัดเปลือกบอระเพ็ดด้วยวิธี Maceration extraction และวิธี Soxhlet extraction ได้ผลดังนี้

1. การสกัดสารจากบอระเพ็ด

จากการสกัดสารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ดด้วยวิธีการ Maceration และ Soxhlet extraction พบว่าได้สารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Comparison of % yield from *Tinospora crispa* extract

Method of Extraction	Weight (g)		% yield
	Dry barks	Crude extracts	
Maceration Extraction	100.13	18.83	18.81
Soxhlet Extraction	100.10	11.06	11.05

2. การวิเคราะห์สารสกัดบอระเพ็ด โดยเครื่อง UV-Spectrophotometer

จากการวิเคราะห์สารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ด

ด้วยวิธีการ Maceration และ Soxhlet Extraction โดยใช้เครื่อง UV-Spectrophotometer (Yokozawa *et al.*, 2001) พบว่าได้กราฟ ดังแสดงใน Figure 2

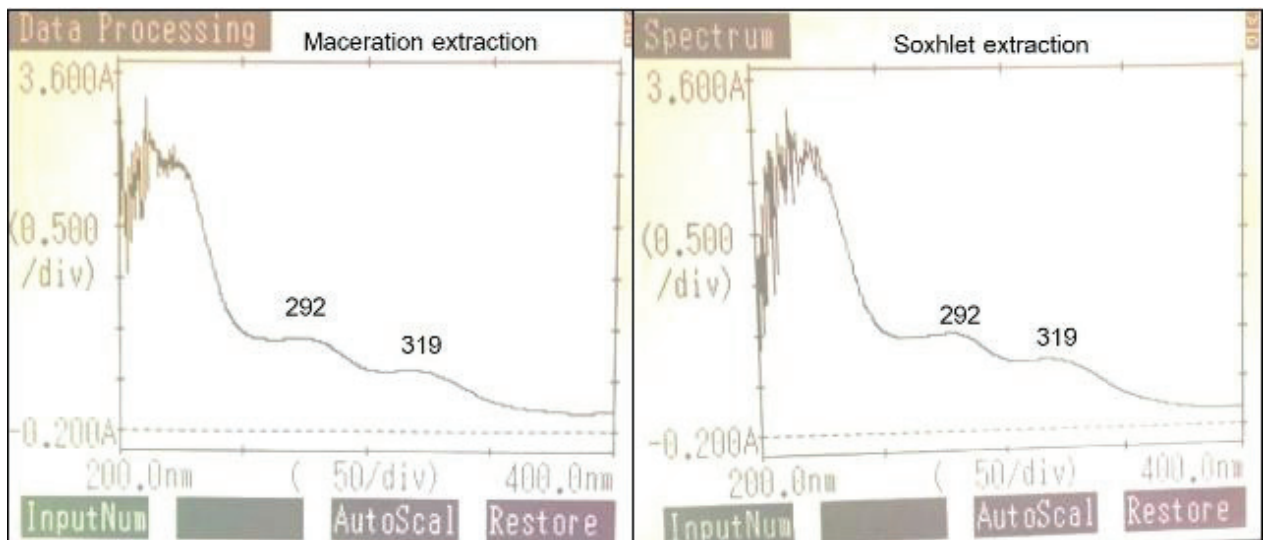


Figure 2 UV Spectrum from bark of *Tinospora crispa* extract by maceration and soxhlet extraction methods

จากการทดลองที่ 2 การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากบอระเพ็ดเพื่อพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์ลดสิวอีกเสบในรูปแบบเจล ได้ผลดังนี้

1. การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความคงตัวของสารสกัดในสูตรตำรับ

จากข้อมูลการสกัดวิธีการ Maceration extraction ให้

% yield ที่สูงกว่าวิธีการ Soxhlet extraction ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัดจากวิธีการ Maceration extraction เพื่อมาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความคงตัวของสารสกัดในสูตรตำรับโดยเครื่อง UV-Spectrophotometer พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงใน Table 4 และกราฟมาตรฐานดัง Figure 3

Table 4 Absorbance of extract at 292 nm and 319 nm

Concentration (mg/mL)	Mean of Absorbance at 292 nm \pm S.D. $y=0.956x+0.3736$, ($R^2 = 0.9966$)	Mean of Absorbance at 319 nm \pm S.D. $y=0.76x+0.3744$, ($R^2 = 0.9951$)
0.20	0.568 \pm 0.001	0.529 \pm 0.001
0.25	0.611 \pm 0.001	0.565 \pm 0.000
0.30	0.654 \pm 0.000	0.595 \pm 0.000
0.35	0.713 \pm 0.000	0.643 \pm 0.001
0.40	0.756 \pm 0.000	0.680 \pm 0.001

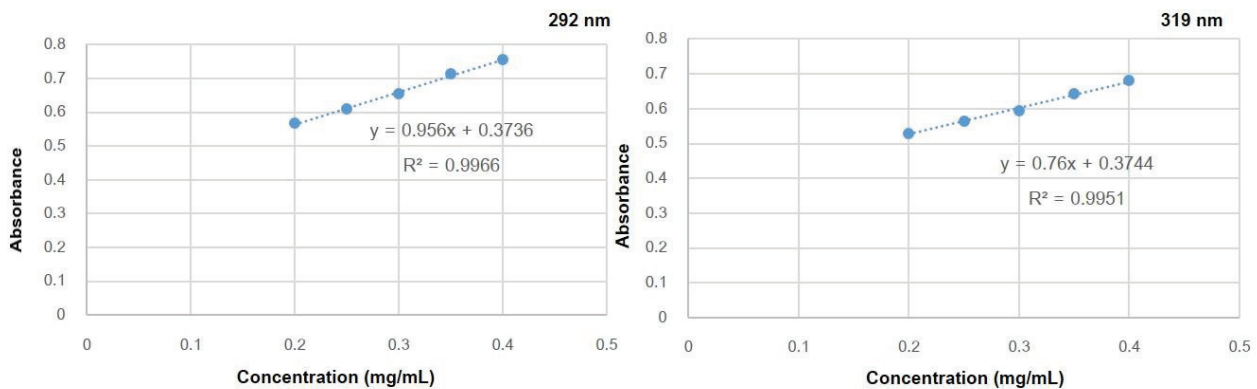


Figure 3 Standard curves of the extract at 292 nm and 319 nm

2. การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด

2.1 การเลือกเจลพื้สำหรับนำไปศึกษาการตั้งสูตรตำรับ

ในการพัฒนาสูตรตำรับเจลสำหรับทาผิวหนึ่งต้องคำนึงถึงความเป็นกรดต่างโดยค่า pH ของผิวหนึ่งในแต่ละส่วนของร่างกายมนุษย์มีความแตกต่างกัน บริเวณผิวหนังและผิวกายจะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.4–5.9 (Sihabud *et al.*,

2018) หรือในช่วง 4.0-7.0 (Lambers, *et al.*, 2006; Schmid-Wendtner & Korting, 2006; Farage *et al.*, 2018) และความหนืดของตำรับที่เหมาะสมกับผิวหนึ่ง เนื่องจากสองปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความสามารถในการดูดซึมและการระคายเคืองกับผิวหนึ่งได้ ดังนั้นสูตรตำรับเจลที่พัฒนาขึ้นควรจะมีค่าความเป็นกรดต่าง ความหนืดของเจลพื้ที่เหมาะสมต่อผิวหนึ่ง และจากการทดลองทำเจลพื้ได้ค่าความเป็นกรดต่าง ดังแสดงใน Table 5

Table 5 pH and viscosity of gel base

Formular	Mean of pH ± S.D. (n=3)	Mean of Viscosity (cP) ± S.D. (n=3)
0.5% Carbopol® 940	5.50±0.01 ^a	4707.44±514.73 ^a
1.0% Carbopol® 940	5.58±0.01 ^b	36865.78±1539.51 ^b
1.5% Carbopol® 940	5.50±0.06 ^c	47260.67±2636.26 ^c
2.0% Carbopol® 940	5.59±0.04 ^d	50007.00±688.42 ^c

Different superscripts in the same column (a, b, c, d) indicate significant differences among the means of groups (Formula of 0.5%, 1%, 1.5%, 2% Carbopol® 940) based on LSD (Post Hoc) comparisons ($p < 0.05$)

เนื่องจากเจลมีลักษณะการไหลแบบ Pseudo Plastic ทำให้ค่าความหนืดที่วัดได้ไม่คงที่ จึงมีกำหนดเวลาในการเก็บข้อมูลคือ 60 วินาที และควบคุมปัจจัยในการวัดความหนืดได้แก่ อุณหภูมิกำหนดเป็นอุณหภูมิห้อง ช่วง 25-27°C รอบกำหนดเป็น 1 RPM ปริมาณของสารที่ใช้ 0.1 mL ซึ่งได้ผลการทดลองความหนืด แสดงดัง Table 6

2.2 การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด

จากการเลือกเจลพื้นฐานสำหรับการนำมาตั้งสูตรตำรับ ทำให้ได้ปริมาณของสารก่อกเจลที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการตั้งสูตรตำรับ โดย Carbopol® 940 ที่เหมาะสมในการ

นำมาเตรียมเจลควรวอยู่ที่ 0.5%-2.5% (Aiyalu *et al.*, 2016) ดังนั้นจึงเลือกที่ 0.5% และ 1% เนื่องจากสองปริมาณดังกล่าวมีความเป็นกรดต่างและมีความหนืดที่เหมาะสมต่อผิวหนังและการเตรียม เจลจึงนำไปใช้ในการตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดและทดสอบหาความคงตัวต่อไป

2.2.1 การทดสอบหาความคงตัว

2.2.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ในการทดสอบความคงตัวด้านคุณสมบัติทางกายภาพจะทำการประเมินสี ความเข้ากันได้ กลิ่นความใส ดังแสดงใน Table 6 และความหนืด ดังแสดง ใน Table 7 ตามลำดับ

Table 6 Results of physical test

Formular/ Physical tests	Before Freeze thaw cycle				After Freeze thaw cycle			
	Color	Homo-geneity	Odor	Clear	Color	Homo-geneity	Odor	Clear
0.5%Carbopol® 940	Color-less	Homo-geneous	No smell	++++	Color-less	Homo-geneous	No smell	++++
0.5% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	Yellow-Green	Homo-geneous	<i>T. crispa</i>	+	Yellow-Green	Homo-geneous	<i>T. crispa</i>	+
1% Carbopol® 940	Color-less	Homo-geneous	No smell	++++	Color-less	Homo-geneous	No smell	++++
1% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	Yellow-Green	Homo-geneous	<i>T. crispa</i>	+	Yellow-Green	Homo-geneous	<i>T. crispa</i>	+

(+ Very little clear, ++ Little clear)

Table 7 Results of viscosity

Formular	Mean of viscosity (cP): Before Freeze thaw cycle	Mean of viscosity (cP): After Freeze thaw cycle \pm S.D. (n=3)		
		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
0.5% Carbopol® 940	4288.44 \pm 416.41	4597.11 \pm 201.09	4674.33 \pm 149.14	5093.33 \pm 231.57 [*]
0.5% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	4233.33 \pm 119.31	4497.89 \pm 402.53	4784.55 \pm 133.73	4619.22 \pm 451.53
1.0% Carbopol® 940	34231.00 \pm 1938.54	34484.44 \pm 707.25	34507.00 \pm 1127.45	35211.33 \pm 353.41
1.0% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	29666.78 \pm 606.25	28972.22 \pm 429.96	28476.11 \pm 318.93 [*]	29192.78 \pm 633.00

^{*}Indicate significant differences among the means of groups compared with before freeze thaw cycle based on LSD (Post Hoc) comparisons ($p < 0.05$)

2.2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี เคมีใช้การทดสอบด้วยวิธี Freeze thaw cycle โดยทำการ
สำหรับการทดสอบความคงตัวด้านคุณสมบัติ ทดสอบความเป็นกรดต่าง ดังแสดงใน Table 8

Table 8 Results of pH

Formular/ pH test	Before Freeze thaw cycle \pm S.D.	After Freeze thaw cycle \pm S.D. (n=3)		
		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
0.5% Carbopol® 940	5.48 \pm 0.07	5.49 \pm 0.01	5.33 \pm 0.14	5.26 \pm 0.03 [*]
0.5% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	5.14 \pm 0.02	5.19 \pm 0.06	5.04 \pm 0.02 [*]	5.14 \pm 0.02
1.0% Carbopol® 940	5.54 \pm 0.02	5.53 \pm 0.04	5.51 \pm 0.07	5.44 \pm 0.03 [*]
1.0% Carbopol® 940 + 5%Crude extract	5.25 \pm 0.02	5.23 \pm 0.08	5.24 \pm 0.05	5.28 \pm 0.07

^{*}Indicate significant differences among the means of groups compared with before freeze thaw cycle based on LSD (Post Hoc) comparisons ($p < 0.05$)

2.2.2 ปริมาณสารสกัดในตำรับ ตูตกเส้นแสงที่ 292 และ 319 nm จึงทำการวัดค่าการดูดแสง
เนื่องจากสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดมีค่าการ ตังกล่าวแล้วได้ผล ดังแสดงใน Table 9 ดังนี้

Table 9 Absorbance of freeze thaw cycle at 292 and 319 nm

Formular/ Absorbance	Before Freeze thaw cycle	Mean of Absorbance 292 nm		
		After Freeze thaw cycle \pm S.D. (n=3)		
		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
0.5% Carbopol®940 + 5%Crude extract	0.741 \pm 0.032	0.772 \pm 0.004	0.746 \pm 0.009	0.733 \pm 0.017
1.0% Carbopol®940 + 5%Crude extract	0.672 \pm 0.030	0.705 \pm 0.005 [*]	0.691 \pm 0.003	0.680 \pm 0.005

Formular	Before Freeze thaw cycle	Mean of Absorbance 319 nm		
		After Freeze thaw cycle \pm S.D. (n=3)		
		Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3
0.5% Carbopol®940 + 5%Crude extract	0.675 \pm 0.030	0.703 \pm 0.003	0.660 \pm 0.010	0.651 \pm 0.014
1.0% Carbopol®940 + 5%Crude extract	0.614 \pm 0.016	0.634 \pm 0.013 [*]	0.629 \pm 0.002	0.614 \pm 0.004

^{*}Indicate significant differences among the means of groups compared with before freeze thaw cycle based on LSD (Post Hoc) comparisons ($p < 0.05$)

วิจารณ์และสรุปผล

จากผลการทดลองที่ 1 และ 2 สามารถสรุปผลดังนี้ คือ

1. การสกัดสารจากบอระเพ็ด

จากผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดด้วยวิธี Maceration Extraction มี % yield เท่ากับ 18.81 ซึ่งมากกว่า 7.76% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Soxhlet Extraction ซึ่งมี % yield เท่ากับ 11.05

2. การวิเคราะห์สารสกัดเปลือกบอระเพ็ด โดยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

จากการวิเคราะห์พบว่าสารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ดที่สกัดด้วยวิธีการ Maceration extraction และสารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ดที่สกัดด้วย Soxhlet extraction เมื่อนำไปหาค่าการดูดกลืนแสงโดย UV-Spectrophotometer พบค่าการดูดกลืนแสงที่ 292 และ 319 nm ของ *N-trans-feruloyltyramine* (Yokozawa *et al.*, 2001) จึงคาดว่าสารสกัดหยาบจากเปลือกบอระเพ็ดน่าจะมีสาร *N-trans-feruloyltyramine* เป็นสารหลักที่พบซึ่งอยู่ในกลุ่ม Alkaloid (Koay & Amir, 2013; Ahmad *et al.*, 2016)

3. ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความคงตัวของสารสกัดในสูตรตำรับ

จากการวิเคราะห์ Standard Curve ของสมการเส้นตรง $y=0.956x+0.3736$, ($R^2 = 0.9966$) ที่ความยาวคลื่น 292 นาโนเมตร และ $y=0.76x+0.3744$, ($R^2 = 0.9951$) ที่ความยาวคลื่นที่ 319 นาโนเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 ที่แสดงถึงค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดซึ่งมีความแม่นยำคิดเป็น 99.66% และ 99.51% ของความยาวคลื่นที่ 292 และ 319 nm ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัดจากเปลือกของบอระเพ็ดด้วยวิธีการ Maceration extraction จากนั้นนำสารสกัดบอระเพ็ด 5% ของสูตรตำรับไปทดสอบด้านต่างๆ ของสูตรตำรับต่อไป

4. การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากบอระเพ็ด

4.1 การเลือกเจลพื้นสำหรับนำไปใช้พัฒนาสูตรตำรับ

โดยทั่วไปคุณสมบัติของความหนืดจะมีความเกี่ยวข้องกับด้านคุณภาพและความคงตัวของตำรับ (Sihabud *et al.*, 2018) จากผลการทดลองค่าความเป็นกรดต่างของเจลพื้น Carbopol® 940 ที่ความเข้มข้น 0.5%-2% อยู่ที่ 5.50-5.59 ส่วนของความหนืดของเจลพื้นอยู่ในช่วง 4707.44-50007.00 cP จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างของเจลพื้นและความหนืดของเจลพื้นด้วย One-way ANOVA พบว่ามีค่าความแตกต่างทางนัยสำคัญทางสถิติ มีค่า p -value 0.036 และ p -value < 0.01 ตามลำดับ จาก Table 5 พบว่ามีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value

< 0.05) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ปริมาณสารก่อเจล 0.5% และ 1.0% Carbopol® 940 เนื่องจากมีความหนืดที่เหมาะสมและมีค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมกับการนำมาใช้บริเวณผิวหนังได้ซึ่งจะมีค่า pH อยู่ที่ 5.4–5.9 (Sihabud *et al.*, 2018)

4.2 การตั้งสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด

จากนั้นเลือกนำเจลพื้นที่มี 0.5% และ 1.0% Carbopol® 940 อยู่ในสูตรตำรับเพื่อนำไปใช้ในการเตรียมสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดและทดสอบหาความคงตัวต่อไป

4.2.1 การทดสอบหาความคงตัว

4.2.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

โดยก่อนทำการทดสอบ Freeze Thaw Cycle ของสูตรตำรับ 0.5% และ 1 % Carbopol® 940 ที่มีสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด จาก Table 6 พบว่าลักษณะของเนื้อเจลเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีเขียวยาวเหลืองนูน มีกลิ่นของบอระเพ็ด และหลังจากทำการทดสอบ Freeze Thaw Cycle พบว่าลักษณะเนื้อเจล สีและกลิ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในส่วนของความหนืด จาก Table 7 ในการเปรียบเทียบค่าความเป็นหนืดของสูตรตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด หลังจากทดสอบ Freeze Thaw Cycle จำนวน 3 รอบ พบว่าสูตรตำรับ 0.5% Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 4619.22 cP ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ Freeze Thaw Cycle (p -value > 0.05) ส่วนในสูตรตำรับ 1.0 % Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 29192.78 cP ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ Freeze Thaw Cycle (p -value > 0.05) เช่นกัน

4.2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

ในด้านความเป็นกรดต่างจากการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างของสูตรตำรับเจลที่มีสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด จาก Table 8 หลังจากทดสอบ Freeze Thaw Cycle จำนวน 3 รอบ พบว่าสูตรตำรับ 0.5% Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ย เท่ากับ 5.14 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ Freeze Thaw Cycle (p -value > 0.05) ส่วนในสูตรตำรับ 1.0% Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ย เท่ากับ 5.28 ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ Freeze Thaw Cycle (p -value > 0.05) เช่นกัน

4.2.2 ปริมาณสารสกัดในตำรับ

จากผลการทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงที่ 292 และ 319 nm โดยการเปรียบเทียบปริมาณสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ด จาก Table 9 หลังจากทดสอบ Freeze Thaw Cycle จำนวน 3 รอบ เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 292 nm พบว่าสูตรตำรับ 0.5% และ 1% Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าเท่ากับ 0.733 และ 0.680 ตามลำดับ และเมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 319 nm พบว่าสูตรตำรับ 0.5% และ 1% Carbopol® 940 + 5% Crude extract มีค่าเท่ากับ 0.651 และ 0.614 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบ Freeze Thaw Cycle พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value > 0.05) เมื่อพิจารณาผลผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านการทดสอบ Freeze Thaw Cycle จำนวน 3 รอบ พบว่าสูตรตำรับ เจลจากสารสกัดเปลือกบอระเพ็ดทั้งที่ 0.5% และ 1% Carbopol® 940 มีความคงตัวทั้งสองสูตรตำรับ

ข้อเสนอแนะ

ในด้านการทดสอบความคงตัวของตำรับเจลสารสกัดจากเปลือกบอระเพ็ดควรทำการทดสอบความคงตัวตามที่ WHO กำหนดซึ่งเป็นการศึกษาความคงตัวแบบ Long term stability test และ Accelerated test เพื่อให้ได้ความน่าเชื่อถือของการทดสอบด้านความคงตัวของตำรับมากยิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนาการวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญในสารสกัด เช่น *N-trans-feruloyltyramine* ด้วยวิธี HPLC เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และควรนำตำรับที่ได้ไปทดสอบฤทธิ์ด้านการอักเสบของผิวหนังเพิ่มเติมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Abood, W.N., Fahmi, I., Abdulla, M.A. & Ismail, S. (2014). Immunomodulatory effect of an isolated fraction from *Tinospora crispa* on intracellular expression of INF-gamma, IL-6 and IL-8. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 1-12.

Agnihotri, S., Wakodev, S. & Agnihotri, A. (2010). An Overview on anti-inflammatory Properties and Chemo-Profiles of plants used in traditional medicine. *Indian journal of Natural Products and Resources*, 151-165.

Ahmad, W., Jantan, I. & Bukhari, S.N.A. (2016). *Tinospora crispa* (L.) Hook. f. & Thomson: A Review of Its Ethnobotanical, Phytochemical, and Pharmacological Aspects. *Frontiers in Pharmacology*, 1-19.

Aiyalu, R., Govindarjan, A. & Ramasamy, A. (2016). Formulation and evaluation of topical herbal gel for the treatment of arthritis in animal model. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 52(3), 493-507.

Ali, M.J., Obaid, R.F. & Obaid, R.F. (2019). Antibacterial activity for acne treatment through medicinal plants extracts: Novel alternative therapies for acne. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(2), 1245-1250.

Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health, Thailand. (1998). *Thai Herbal Pharmacopoeia volume I: Boraphet*. Office of Notional Buddhishm Press: Bangkok. (in Thai)

Do, J.E., Cho, S.M., In, S.I., Lim, K.Y., Lee, S., & Lee, E.S. (2009). Psychosocial aspects of acne vulgaris: A community-based study with Korean adolescents. *Annals of Dermatology*, 21(2), 125-129.

Farage M. A., Hood, W., Berardesca, E. & Maibach, H. (2018). Intrinsic and Extrinsic Factors Affecting Skin Surface pH. *Current Problems in Dermatology*, 54, 33-47.

Higashino, H., Suzuki, A., Tanaka, Y. & Pootakham, K. (1992). Inhibitory effects of siamese *Tinospora crispa* extracts on the carrageenin-induced foot pad edema in rats (the 1st report). *Folia Pharmacologica Japonica*, 100(4), 339-344.

Hipol, R.L.B, Cariaga, M.F.N.M. & Hipol, R.M. (2012). Anti-inflammatory activities of the aqueous extract of the stem of *Tinospora crispa* (Family Menispermaceae). *Journal of Nature Studies*, 11(1&2), 88-95.

Homhual, S. (2010). *Tinospora crispa*. Faculty of Pharmaceutical Sciences, Ubon Ratchathani University. Retrived October 18, 2018 from <http://www.phargarden.com/main.php?action=viewpage&pid=64> (in Thai)

Ibahim, M., I'zzah, W.N.W., Narimah, A., Asyikin, N.Z., Shafinas, S.-N.S., & Froemming, G. (2011). Anti-proliferative and antioxidant effects of *Tinospora crispa* (Batawali). *Biomedical Research-India*, 22, 57-62.

Ismail, M. & Choudhary, M.I. (2016). Compounds Isolated from *Tinospora crispa*. *Chemistry of Natural Compounds*, 52(6), 1151-1153.

- Jiang, Y., Yu, L. & Wang, M-H. (2015). N-trans-feruloyltyramine inhibits LPS-induced NO and PGE2 production in RAW 264.7 macrophages: Involvement of AP-1 and MAP kinase signalling pathways. *Chemico-biological Interactions*, 235, 56-62.
- Khunawattanakul, W., Caichompoo, W., Mekjaraskul, C., Charoenmit, A., Lekdee, C. & Srichan, N. (2017). Anti-Propionibacterium acnes from Thai herbal medicines. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*. 36(5), 608-613. (in Thai)
- Kim, J.E., Jo, Y.J. & Lee, N.H. (2018). Anti-inflammatory and Anti-bacterial Constituents from the Extracts of *Daucus carota* var. *sativa* Aerial Parts. *Journal of Society of Cosmetic Scientists of Korea*, 44(4), 427-436.
- Koay, Y.C. & Amir, F. (2013). A Review of the Secondary Metabolites and Biological. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 641-649.
- Kongsaktrakoon, B., Temsiririkkul, R., Suvitayavat, W., Nakornchai, S. & Wongkrajang, Y. (1994). The antipyretic effect of *Tinospora crispa* Mier ex Hook.f. & Thoms. *Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences*. 21(1), 1-6.
- Lambers, H., Piessens, S., Bloem, A., Pronk, H., & Finkel, P. (2006). Natural skin surface pH is on average below 5, which is beneficial for its resident flora. *International Journal of Cosmetic Science*, 28(5), 359-370.
- Misal, G., Dixit, G. & Gulkari. V. (2012). Formulation and evaluation of herbal gel. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 3(4), 501-505.
- Mokkhasmit, M., Ngarmwathana, W., Sawasdimongkol, K. & Permiphphat, U. (1971). Pharmacological evaluation of Thai medicinal plants (continued). *Journal of the Medical Association of Thailand*, 54(7), 490-504.
- Monika, M., Stefanie, H. & Alois, J. (2010). *Anti-inflammatory activity of extracts from fruits, herbs and spices*. Elsevier Ltd.
- Noor, H. Hammonds, P., Sutton, R. & Asheroft S.T.H. (1989). The Hypoglycaemic and Insulinotropic activity of *Tinospora crispa*: Studies with human and rat islets and HIT-TISB cell. *Diabetologia*, 32(6), 354-359.
- Park, C.-H., Min, S.-Y., Yu, H.-W., Kim, K., Kim, S. Lee, H.-J., Kim, J.-H., & Park, Y.-J. (2020). Effects of Apigenin on RBL-2H3, RAW264.7, and HaCaT Cells: Anti-Allergic, Anti-Inflammatory, and Skin-Protective Activities. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4620), 1-17.
- Queiroz, M.B.R. Lucena, G.M.R.S., Caldas, E.D. & Silva, M.V. (2014). Evaluation of the anti-inflammatory activity of gel with *Matricaria recutita* L. using a permeation enhancer. *Revista Brasileira de Farmácia*, 95(2), 676-694.
- Rowe, R.C., Sheskey, P.J., Cook, W.G. & Fenton, M.E. (2012). *Handbook of Pharmaceutical Excipients* (7th Edition). USA: Pharmaceutical Press.
- Schmid-Wendtner, M.H., & Korting, H.C. (2006). The pH of the skin surface and its impact on the barrier function. *Skin Pharmacology and Physiology*, 19(6), 296-302.
- Sharma, P., Dwivedee, B.P., Bisht, P., Dash, A.K. & Kumar, D. (2019). The chemical constituents and diverse pharmacological importance of *Tinospora cordifolia*. *Heliyon*, 5, 1-8.
- Sihabud, V., Duangjit, S., Yingngam, B. & Pitchayajittipong, C. (2018). Development of Sesame Oil Loaded Bigels for Dry Skin Relief. *Isan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 14(4), 122-131. (in Thai)
- Smitinand, T. (2010). Thai plant names. *Thai Journal Online*. Retrived January 20, 2018 from http://eherb.hrdi.or.th/search_result_details.php?herbariumID=722 (in Thai)
- Sriyapai, C., Dhumma-upakorn, R., Sangwatanaroj, S., Kongkathip, N. & Krittiyanunt, S. (2009). Hypoglycemic effect of *Tinospora crispa* dry powder in outpatients with metabolic syndrome at king chulalongkorn memorial hospital. *Journal of Health Research*, 23(3), 125-133.
- Techasatian, L. (2016). Acne. The heart of pediatrics, 32. *Srinagarind Medical Journal*, 31(5).
- Udompataikul, M. (2018). Dermatology: Acne Vulgaris. *The Royal College Pediatricians of Thailand*. Retrived June 15, 2020 from <http://www.thaipediatrics.org/Media/media-20180403103621.pdf> (in Thai)

- U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration. (1998). *Guidance for Industry Stability Testing of Drug Substances and Drug Products*. Draft Guidance, 72.
- Wetwitayaklung, P. (2012). *Anti-inflammatory of Ginseng*. Department of Pharmacognosy, Silpakorn University.
- Yang, G. & An, H.-J. (2014). β -sitosteroyl-3-O- β -glucopyranoside isolated from the bark of *Sorbus commixta* ameliorates pro-inflammatory mediators in RAW 264.7 macrophages. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, 36(1), 70-7.
- Yokozawa, T., Tanaka, T. & Kimura, T. (2001). Examination of the Nitric Oxide Production-Suppressing Component in *Tinospora tuberculata*. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 24(10), 1153-1156.
- Zulkefli, H.N., Mohama, J. & Abidin, N.Z. (2013). Antioxidant activity of methanol extract of *Tinospora crispa* and *Tabernaemontana corymbosa*. *Sains Malays*, 697-706.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ให้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักให้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองให้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt. ตัวบาง**

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ให้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

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

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

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

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

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

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

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

บทคัดย่อ (Abstract) เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 300 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาท่อนหน้า

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

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

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

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

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

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

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

มานะ สิ้นฐานษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, 18(2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณานุกรม (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). เติลนิวส์ว่าไรดี: 'สื่อพิพิธภัณฑน์' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต. *เติลนิวส์*, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี*. http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73h_VYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Instruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Abstract: This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **300 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

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

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Aim and Scope:

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

Ownership

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

Advisors

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

Editor-in-Chief

Professor Dr. Preecha Prathepha

Assistant Editors

Professor Dr. Pairot Pramual
Maharakham University
Professor Dr. Sirithon Siriamornpun
Maharakham University
Associate Professor Dr. Worapol Aengwanich
Maharakham University
Associate Professor Dr. Vallaya Sutthikhum
Maharakham University

Editorial Board

Professor Dr. Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr. La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr. Pranee Anprung
Chulalongkorn University
Professor Dr. Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr. Anongrit Kangrang
Maharakham University
Professor Dr. Wongsak Laohasiriwong
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Sunan Saikrasun
Maharakham University
Associate Professor Dr. Suwantha Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr. Kwanjai Kanokmedhakul
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. Orawich Goompol
Maharakham University
Associate Professor Dr. Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr. Chawalit Boonpok
Maharakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Khon Kaen University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Assistant Professor Dr. Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr. Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr. Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr. Walaiporn Tongjaroenbuengam
Maharakham University
Assistant Professor Dr. Alongkorn Lamom
Maharakham University
Assistant Professor Dr. Natapol Pumipuntu
Maharakham University
Assistant Professor Dr. Somnuk Puangpronpitag
Maharakham University
Dr. Rakjinda Wattanalai
Siam University
Dr. Adrian Roderick Plant
Maharakham University

Secretary

Chaweewan Akkasesthang

Assistant secretary

Phakwilai Rungwisai
Jirarat Puseerit

Six issues per year

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