

วารสาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 43 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2567

ISSN (Print) : 2985-2617

ISSN (Online) : 2985-2625

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์/โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา

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

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

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

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอองศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานปรื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าศิริวงษ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมฆากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรธนา บุญยะสิทธิ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนอมแก้ว

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง

มหาวิทยาลัยนครพนม

รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธุ์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรรค์ สุขะเสนา

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อาจารย์ เกสัชกร ดร.รักษิณดา วัฒนาลัย

มหาวิทยาลัยสยาม

Dr. Adrian Roderick Plant

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พัศตรวิไล รุ่งวิสัย
จิรารัตน์ ภูสิฤทธิ

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

การดำเนินชีวิตของมนุษยชาติและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อาศัยบนโลก ล้วนมีความเสี่ยงที่จะประสบปัญหาต่าง ๆ ปี ค.ศ. 2024 มีการสำรวจโดย The world Economic Forum ด้านมิติด้านการรับรู้วิกฤติของโลก ผู้ตอบแบบสำรวจเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านต่าง ๆ กว่า 1,400 คน ที่ได้รับการคัดเลือกให้ตอบแบบสอบถามโดยให้เลือก 5 อันดับแรกความเสี่ยงที่จะอุบัติขึ้นและมีความร้ายแรงสุดชั่ว ผลการสำรวจมีความเสี่ยงในปี 5 อันดับแรก ได้แก่ สภาพอากาศรุนแรงแบบสุดขีด (extreme weather) ข้อมูลเท็จและการบิดเบือนจาก AI (AI-generated misinformation and disinformation) การแบ่งขั้วทางสังคมหรือการเมือง (societal and/or political polarization) วิกฤติค่าครองชีพ (cost-of-living-crisis) และการโจมตีทางไซเบอร์ (cyberattacks) เป็นที่แน่ชัดว่าความเสี่ยงทั้ง 5 ด้าน ที่ได้รับการยืนยันจากผู้เชี่ยวชาญ ล้วนแล้วนั้น “เกิดขึ้นจริง และเป็นวิกฤติร้ายแรง” ซึ่งพบในสื่อต่าง ๆ ที่นำเสนอในทุก ๆ วัน

ในวงวิชาการการวิจัยมีการใช้เครื่องมือที่ใช้ AI มีหลากหลายแอปพลิเคชันที่แข่งขันกันในตลาด มีผู้เชี่ยวชาญสอนการวิจัยโดยใช้ AI เพื่อปริญาโท หรือ ปริญาเอก ประเด็นเหล่านี้พึงระมัดระวังพิจารณาให้ถี่ถ้วน AI ใช้ได้ในกรณีใดบ้าง ในวงการวิจัย วารสารวิชาการที่ได้มาตรฐานสากล ได้ออกคำเตือนการทำวิจัยว่า AI จะถูกยอมรับได้เพื่อเสนอบทความวิจัยลงตีพิมพ์ในวารสารนั้น ๆ เช่น สำนักพิมพ์ Elsevier กำหนดว่า บทความวิจัยที่จะยอมรับเข้าสู่กระบวนการ peer review นั้น AI จะใช้ได้เฉพาะ “การเขียน” เท่านั้น และไม่สามารถใช้ AI เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล หรือ ใช้สร้างข้อมูลใหม่หรือสังเคราะห์ข้อมูลใหม่จากข้อมูลที่ได้จากการวิจัย และกำหนดให้ผู้เขียนบทความต้องระบุว่าได้ดำเนินการตามที่สำนักพิมพ์กำหนดเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือที่ใช้ AI และย้ำว่า AI ใช้ได้ในบทความวิจัยเฉพาะ “improve readability and language of the work”

บรรณาธิการหวังว่านักวิจัย หรือ ผู้เขียนบทความวิจัย ได้ตระหนักและพึงสังวรณในสิ่งเหล่านี้ ก่อนที่ปัญหาใหม่จะอุบัติขึ้นในผลงานทางวิชาการของท่าน การเข้าใจ การนำไปใช้เครื่องมือที่มีระบบ AI ต้องมีข้อยุติที่ไม่ขัดต่อจริยธรรมการวิจัย หรือ ethical questions ภายใต้เทคโนโลยีล้ำสมัยที่มนุษย์สร้างขึ้น

ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ประเทพา

บรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สารบัญ

Agricultural Science

- การคัดเลือกสารห่อหุ้มที่เหมาะสมในกระบวนการไมโครเอนแคปซูเลชันโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเชื้อสืทอง
ด้วยมอลโทเดกซ์ทรินและเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน 257

Selection of optimal wall materials for microencapsulation of protein isolate from *Cordyceps militaris* with Maltodextrin and β -Cyclodextrin

ณัฐพงษ์ มุ่งเมือง, วิจิตรา แดงปรก, จิตราพร งามพิระพงศ์, มงคล ถิรบุญยานนท์, กิตติมา ลีละพงศ์วัฒนา,
สิริมา สินธุสำราญ, สิริพันธ์ ปัญญาคม และ ชีระพล เสนพันธ์
Natthapong Mungmucang, Wichitra Daengprok, Chitraporn Ngampeerapong, Mongkol Thirabunyanon,
Kittima Leelapongwattana, Sirima Sinthusamran, Sirin Panyakom and Theerapol Senphan

- การเจริญเติบโตและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายใต้แสงเทียมและการพัฒนาสารเคลือบบริโภคได้จากสารสกัด
กล้วยไม้เหลืองจันทร์บูร 269

Growth and bioactives content of *Dendrobium friedericksianum* Rchb.f. under artificial lights and development of edible coating from an extract

พรพรรณ สุขุมพินิจ, หยาดรุ้ง สุวรรณรัตน์ และ วริชชนม์ นิลนนท์
Pornpan Sukhumpinij, Yardrun Suwannarat1 and Waritchon Ninlanon

- ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากพืชสูตรผสม และการประยุกต์ใช้ในสบู่เหลว 277

Antibacterial activities of formulated plant ethanolic extracts and application in liquid soap products

มณฑล วิสุทธิ, จุฬามาต หนูชื่น, จัตุรสุดา ถนอมศิลป์, ชนัตรา พลวงนอก และ วิมลรัตน์ ขวกเขียว
Monton Visutthi, Chuthamat Nuchuen, Chatsuda Thanomsin, Chanattra Pluangnok and Wimonrat Khuakkhiao

Biological Science

- การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและปริมาณธาตุอาหารหลักในวัสดุเลี้ยงตัวงมะพร้าว 287

The isolation of cellulase producing bacteria and macronutrient components in coconut weevil feed

พรชนก บุญลับ, นภัสสร วงเปริยาว และ กิตติ ตันเมืองปัก
Pornchanok Boonlub, Napatsorn Wongpriaw and Kitti Tanmuangpak

- การพัฒนาไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก 297

Development of soymilk ice cream mixed with pulp from ripe palmyra fruit (*Borassus flabellifer* L.)

สัชชัย ยอดมณี
Sanchai Yotmanee

- ความหลากหลายทางสัณฐานวิทยาของกระท่อม (*Mitragyna speciosa* (Korth) Havil) ระดับประชากรในภาคใต้ของประเทศไทย 308

Morphological diversity of Kratom (*Mitragyna speciosa* (Korth) Havil) at population level in Southern of Thailand

วิโรจน์ เชาว์วิเศษ, ศุภฤกษ์ สุขสมาน และ เกษร เมืองทิพย์
Wirot Chaowiset, Suparerk Sooksmarn and Kesorn Muangtip

Engineering

- การพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมน
บนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง 320

Development of smart control system for cultivation of orange man Japanese melon in greenhouses via IoT platform

ลัญฉกร นิลทรัตน์, สมศักดิ์ อรรถภิมากุล และ ศรัณย์ ณรงค์กุล
Lanchakorn Nintarat, Somsak Akatimagool and Sarun Narongkul

Physical Science

- การผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากความร้อนทิ้งของเตาปิ้งย่าง 332

Thermoelectricity from a grill stove's waste heat

สุรจิตร พระเมือง
Surajitr Pramuang

การคัดเลือกสารห่อหุ้มที่เหมาะสมในกระบวนการไมโครเอนแคปซูล โปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองด้วยมอลโทเดกซ์ทรินและเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน

Selection of optimal wall materials for microencapsulation of protein isolate from *Cordyceps militaris* with Maltodextrin and β -Cyclodextrin

ณัฐพงษ์ มุงเมือง¹, วิจิตรา แดงปรก¹, จิตราพร งามพีระพงศ์¹, มงคล ธิรบุญยานนท์²,
กิตติมา ลีละพงศ์วัฒนา³, สิริมา สินธุสำราญ⁴, สิริพันธ์ ปัญญาคม⁵ และ วีระพล เสนพันธ์^{1*}
Natthapong Mungmucang¹, Wichittra Daengprok¹, Chitraporn Ngampeerapong¹,
Mongkol Thirabunyanon², Kittima Leelapongwattana³, Sirima Sinthusamran⁴,
Sirin Panyakom⁵ and Theerapol Senphan^{1*}

Received: 24 July 2023 ; Revised: 11 September 2023 ; Accepted: 5 October 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทอง ด้วยเทคนิคทำแห้งแบบพ่นฝอยใช้สารห่อหุ้มมอลโทเดกซ์ทริน (MD) และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน (β -CD) และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน (MD: β -CD) ที่อัตราส่วนร้อยละ 1:1, 1:2 และ 2:1 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) อัตราส่วนการห่อหุ้มระหว่างโปรตีนไอโซเลตและสารห่อหุ้ม 1:4 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผงไมโครเอนแคปซูล ได้แก่ ร้อยละผลผลิต ค่าสี กิจกรรมของน้ำอิสระ ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม ความสามารถในการละลาย องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS พบว่า โปรตีนไอโซเลตที่ห่อหุ้มด้วย MD1: β -CD2 มีร้อยละผลผลิต และปริมาณโปรตีนสูงที่สุดถึงร้อยละ 73.89 และ 16.75 อย่างไม่ก็ตามโปรตีนไอโซเลตที่ห่อหุ้มด้วย β -CD มีประสิทธิภาพการห่อหุ้มและความสามารถในการละลายสูงที่สุดร้อยละ 89.44 และ 95.67 ตามลำดับ นอกจากนี้ไมโครเอนแคปซูลทุกชุดการทดลองมีกิจกรรมของน้ำอิสระ ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) และค่าความต่างสี (ΔE^*) อยู่ในช่วง 0.21-0.25 74.74-79.20 7.32-8.65 35.59-41.52 และ 38.94-46.21 ตามลำดับ โปรตีนไอโซเลตที่ห่อหุ้มด้วย β -CD มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 101.45 mg GAE/g sample แต่การห่อหุ้มด้วย MD1: β -CD2 มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS สูงสุดเท่ากับ 1,536.49 μ mol Trolox equivalent/g sample ตามลำดับ ดังนั้นโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองที่ห่อหุ้มด้วย MD1: β -CD2 เมื่อพิจารณาจากร้อยละผลผลิตและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่สูงจึงเป็นกระบวนการห่อหุ้มที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: ไมโครเอนแคปซูล, เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน, มอลโทเดกซ์ทริน, เห็ดถั่งเช่าสีทอง

¹ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

⁴ ภาควิชาครุศาสตร์เกษตร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁵ สาขาวิชาหลักสูตรและการสอน คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

¹ Program in Food Science and Technology, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

² Program in Biotechnology, Faculty of Science, Maejo University

³ Program in Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Phetchaburi Rajabhat University

⁴ Department of Agricultural Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

⁵ Program in Curriculum and Instruction, Faculty of Education, Sakon Nakhon Rajabhat University

* Corresponding author E-mail: theeraphol_s@mju.ac.th

Abstract

We report the study of the microencapsulation processes of a protein isolate from *Cordyceps militaris* using spray drying technique. Maltodextrin (MD), β -cyclodextrin (β -CD) and maltodextrin mixed with β -cyclodextrin (MD: β -CD) at ratio of 1:1, 1:2 and 2:1 (weight/weight) and the ratio of protein isolate to wall material of 1:4 (weight/weight) were used as experimental variables. Physicochemical properties of microencapsulated powder, i.e., yield percentage, color value, water activity, encapsulation efficiency, solubility, chemical composition, total phenolic content, DPPH and ABTS radical activities were investigated. Protein isolates encapsulated with MD1: β -CD2 had the highest yield percentage and protein content of 73.89% and 16.75%. However, β -CD encapsulated had the highest encapsulation efficiency and solubility of 89.44% and 95.67%, respectively. In addition, all treatments of microencapsulated powder had water activity, lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*), and total color difference (ΔE^*) values in the range of 0.21-0.25, 74.74-79.20, 7.32-8.65, 35.59-41.52 and 38.94-46.21, respectively. β -CD encapsulated protein isolate powder had the highest total phenolic content of 101.45 mg GAE/g sample, but MD1: β -CD2 encapsulated protein powder had the highest ABTS radical scavenging activities of 1536.49 μ mol Trolox equivalent/g sample, respectively. Therefore, the protein isolate encapsulated with MD1: β -CD2 with its high yield percentage and antioxidant activity, represents an optimal microencapsulation process for *Cordyceps militaris*.

Keywords: Microencapsulation, β -Cyclodextrin, maltodextrin, *cordyceps militaris*

บทนำ

เห็ดถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) เป็นราที่เกิดจากแมลง มีคุณสมบัติทางชีวภาพที่หลากหลายจึงมักมีการนำมาใช้เป็นยา เนื่องจากมีสารอาหารที่สำคัญ เช่น กรดอะมิโนจำเป็น โปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ แคโรทีนอยด์ วิตามิน แร่ธาตุ รวมถึงมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สูง ได้แก่ คอร์ดิซิปีน (cordycepin) อะดีโนซีน (adenosine) มีสรรพคุณช่วยในการลดการอักเสบ ป้องกันการเกิดมะเร็ง และสร้างภูมิคุ้มกัน (Phull et al., 2022) มีรายงานว่า เห็ดถั่งเช่าสีทองมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 28.91 ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กลูเทลิน ร้อยละ 43.11 อัลบูมินร้อยละ 36.47 และไกลบูลินร้อยละ 17.94 (Yu et al., 2021) ในงานวิจัยของ Yang et al., (2015) ได้รายงานว่า สารสกัดโปรตีนจากเห็ดถั่งเช่าสีทองมีฤทธิ์ยับยั้งการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง ต้านไวรัส และยับยั้งเชื้อราเป็นต้น นอกจากนี้มีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่า สารสกัดโปรตีนจากเห็ดราสามารถช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด ป้องกันการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ รวมถึงช่วยเพิ่มความอึดได้นานขึ้น (Derbyshire & Delange, 2021)

กระบวนการไมโครเอนแคปซูเลชัน (microencapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารสำคัญที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว รวมถึงก๊าซที่อยู่ในไมโครแคปซูล (core) เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ออกซิเจน แสง และความชื้น เป็นต้น รวมถึงการเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอื่น ๆ และช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญในสภาพแวดล้อมได้ ในด้านอุตสาหกรรมอาหาร

นิยมนำมาห่อหุ้มสารให้กลิ่นรส สารให้สี สารสกัดโปรตีน เอนไซม์ และน้ำมันหอมระเหย เพื่อให้คงต่อการเปลี่ยนแปลงได้นานขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะห่อหุ้มสารสำคัญด้วยพอลิเมอร์ให้มียูนิทขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-1,000 ไมครอน (Mohammed et al., 2020) สารห่อหุ้ม (wall material) ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการไมโครเอนแคปซูลมากที่สุด คือ พอลิแซ็กคาไรด์ เช่น มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) เนื่องจากมีราคาถูก ลักษณะเป็นผงสีขาวที่ไม่มีกลิ่น มีความสามารถในการละลายสูง ไม่มีรสชาติ มีความหนืดต่ำ และช่วยป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อน (Akbarbaglu et al., 2021) และไซโคลเดกซ์ทริน (cyclodextrins) เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่นิยมใช้เป็นสารห่อหุ้มในกลุ่มสารสำคัญจำพวกวิตามิน สารให้สี กลิ่นรส สารสกัดจากผลไม้ และน้ำมันหอมระเหย โดยส่วนใหญ่มักนิยมใช้ เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน (β -cyclodextrins) เนื่องจากมีราคาถูก มีสมบัติที่เสถียรต่อความร้อนสูง เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินจะละลายตัวเมื่อมีอุณหภูมิสูงที่ 200 องศาเซลเซียส ช่วยให้มีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการดูดซับที่สูง ซึ่งเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินผ่านการรับรองโดยองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาที่สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ (Flores & Caro, 2022; Ghorbanzade et al., 2022) เทคนิคไมโครเอนแคปซูลด้วยการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมานาน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ มีวิธีการที่ง่ายไม่ยุ่งยาก และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีคุณภาพสูง (Grgić et al., 2020) ปัจจุบันนิยมนำโปรตีนมาเก็บรักษาด้วยกระบวนการไมโครเอน

แคปซูลมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นโปรตีนไอโซเลต โปรตีนไฮโดรไลเสต รวมถึงสารสกัดเปปไทด์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ในระหว่างการขนส่ง และการเก็บรักษา (Jafari *et al.*, 2019; Sarabandi *et al.*, 2020)

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของกระบวนการไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องด้วยสารห่อหุ้ม ได้แก่ มอลโทเดกซ์ทริน (MD) เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน (β -CD) และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้อง

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้อง

เห็ดถึงเข้าสู่ท้องยาว 8-10 เซนติเมตร อายุ 47-55 วัน โดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจากห้องปฏิบัติการของสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ นำมาทำความสะอาด และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดผงให้ละเอียดที่มีขนาด 250 ไมโครเมตร และทำการสกัดโปรตีนโดยการตกตะกอนด้วยเกลือแอมโมเนียมซัลเฟตตามวิธีของ Zhang *et al.*, (2017) ทำแห้งสารละลายโปรตีนไอโซเลตที่ได้ด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (DW8, Heto Power Dry, Denmark) นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2. การเตรียมไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้อง

นำผงโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องมาผลิตเป็นไมโครเอนแคปซูลด้วยกระบวนการไมโครเอนแคปซูลชั้นโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Takeungwongtrakul & Benjakul (2017) ซึ่งใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ จำนวน 5 ชุดทดลอง ได้แก่ มอลโทเดกซ์ทริน เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ใช้การวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) นำสารห่อหุ้มข้างต้นมาละลายด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 22.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบใบกวน (IKA-Labortechnik, Germany) ที่ความเร็ว 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามด้วยเติมผงโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องในสารละลายห่อหุ้มโดยใช้อัตราส่วน 1:4 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) จากนั้นปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วย

เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Ultra-Turrax T25, IKA-Labortechnik, Germany) ที่ความเร็ว 22,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 นาที นำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Lab Plant SD-06A, Lab Plant Ltd., Huddersfield, UK) กำหนดให้อุณหภูมิเข้าที่ 180 องศาเซลเซียส อัตราความเร็วลมที่ป้อน $0.54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ จะได้ผงเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะปรากฏ ร้อยละผลผลิต ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม ค่ากิจกรรมของน้ำอิสระ ความสามารถในการละลาย ค่าสี องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระต่อไป

3. การวิเคราะห์ลักษณะปรากฏ (appearance)

ลักษณะปรากฏของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ 5 ชุดการทดลองจะถูกถ่ายรูปด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล (X-A3, Fujifilm, Tokyo)

4. การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต (% yield)

ร้อยละผลผลิตของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้อง คำนวณจากสมการที่ (1)

$$\text{ผลผลิต (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังทำแห้ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}} \quad (1)$$

5. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (encapsulation efficiency; EE)

นำโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องที่ใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ มาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดด้วยวิธีไบยูเรต เพื่อหาปริมาณโปรตีนก่อนการห่อหุ้ม จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนบนพื้นผิวหลังจากการห่อหุ้มดัดแปลงตามวิธีของ Maqsoudlou *et al.*, (2020) นำผงเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องจำนวน 100 กรัม ผสมกับโพแทสเซียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร โดยผสมให้เข้ากัน แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไบยูเรตตามวิธีของ (Robinson and Hogden, 1940) คำนวณประสิทธิภาพการห่อหุ้มจากสมการที่ (2)

$$\text{ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{A} \quad (2)$$

โดย A = ปริมาณโปรตีนก่อนห่อหุ้ม (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)
B = ปริมาณโปรตีนหลังห่อหุ้ม (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)

6. การวิเคราะห์กิจกรรมของน้ำอิสระ (water activity; a_w)

วัดค่ากิจกรรมของน้ำอิสระของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดกิจกรรมของน้ำอิสระ (Series 3 TE, Aqua LAB, U.S.A) โดยใช้ตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในเซลล์ของเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระก่อนวิเคราะห์ค่ากิจกรรมของน้ำอิสระที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

7. การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย (solubility)

ความสามารถในการละลายของผงเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ วัดตามวิธีของ Loksuwan (2007) ซึ่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 8,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้เติมลงในถ้วยอลูมิเนียมปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คำนวณความสามารถในการละลายจากสมการที่ (3)

$$\text{ความสามารถในการละลาย (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{A} \quad (3)$$

โดย A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

8. การวิเคราะห์ค่าสี (L^* , a^* , b^* and ΔE^*)

นำผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ มาวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab (Color Flex EZ, Hunter Lab, U.S.A) ในระบบ CIE โดยค่า L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง a^* ใช้กำหนดค่าสีแดง/เขียว เมื่อ (+) แทนค่าสีแดง (-) แทนค่าสีเขียว และค่า b^* ใช้กำหนดค่าสีเหลือง/น้ำเงิน เมื่อ (+) แทนค่าสีเหลือง (-) แทนค่าสีน้ำเงิน และค่าความต่างของสี ΔE^* โดยคำนวณจากสมการที่ (4)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

โดยที่ ΔL^* , Δa^* และ Δb^* คือ ความต่างระหว่างพารามิเตอร์สีของตัวอย่าง และพารามิเตอร์สีของสแตนด์การ์ดสีขาว ($L^* = 93.59$, $a^* = -0.98$ และ $b^* = 0.35$) ซึ่งใช้เป็นแผ่น Background

9. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

วิเคราะห์ร้อยละปริมาณความชื้น (moisture) ไขมัน (fat) เถ้า (ash) และโปรตีน (protein) ตามวิธีของ AOAC, (2000) วิธีที่ 927.05, 984.13, 942.05 และ 920.38 ตามลำดับ ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) คำนวณจาก $100 - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{ไขมัน} + \% \text{เถ้า} + \% \text{โปรตีน})$

10. การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric ตามวิธีของ Kosasu et al., (2015) นำผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ 5 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent เข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (VIS-732G, Rayleigh, China) ที่ระดับความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้เมทานอลเป็นแบลนด์ (blank) และเตรียมกราฟมาตรฐานโดยใช้กรดแกลลิกที่ความเข้มข้น 25-400 ไมโครโมล/มิลลิลิตร รายงานปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในหน่วยของ mg GAE/g sample

11. การวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

11.1 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity)

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH วิเคราะห์โดยวัดตามวิธีของ Wu et al., (2003) นำผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ 5 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เติมลงในหลอดทดลองที่มีสารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) เข้มข้น 0.15 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร นำไปบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ระดับความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ และเตรียมกราฟมาตรฐานโดยใช้ Trolox เข้มข้น 10-60 ไมโครโมลาร์ รายงานผลในหน่วยของ $\mu\text{mol Trolox equivalent/g sample}$

11.2 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS (ABTS radical scavenging activity)

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS วิเคราะห์โดยดัดแปลงตามวิธีของ Binsan *et al.*, (2008) นำผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ 5 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเปิดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 150 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย ABTS (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) เข้มข้น 7.4 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2,850 ไมโครลิตร บ่มในที่มืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ระดับความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ และเตรียมกราฟมาตรฐานโดยใช้ Trolox เข้มข้น 10-600 ไมโครโมลาร์ รายงานผลในหน่วย $\mu\text{mol Trolox equivalent/g sample}$

12. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้วิธี ANOVA วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) กำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่

ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS (statistical package for the social science for windows version 29.0) (SPSS Inc., Chicago, USA)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ลักษณะปรากฏ

ผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้ม ได้แก่ มอลโทเดกซ์ทริน เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) พบว่าลักษณะทางกายภาพของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ (Figure 1) มีผงสีเหลืองอ่อนที่ละเอียด เนื่องจากใช้คุณสมบัติที่สูงในการทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้ผงไมโครเอนแคปซูลที่ได้ไม่จับตัวกันเป็นก้อน อีกทั้งในการเติมสารห่อหุ้มข้างต้นจะช่วยทำให้โครงสร้างของไมโครเอนแคปซูลเกิดความคงตัวเพิ่มมากขึ้น เกิดรูพรุนในโครงสร้างจึงส่งผลต่อผงไมโครเอนแคปซูลที่ได้มีความชื้น และปริมาณน้ำอิสระที่ต่ำ (Suyalek *et al.*, 2020)

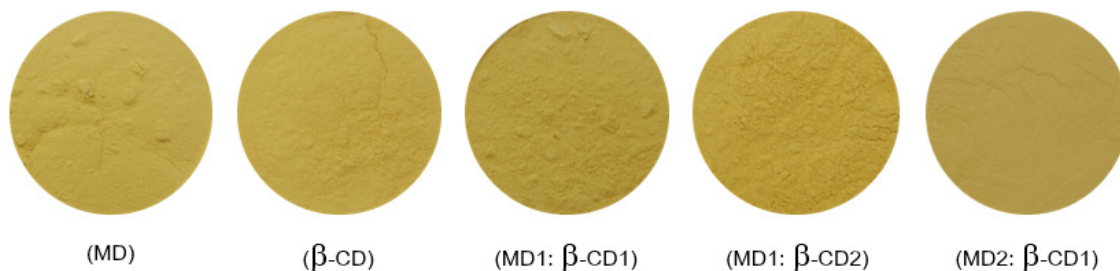


Figure 1 The appearance of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris*

ร้อยละผลผลิตและประสิทธิภาพการห่อหุ้ม

การศึกษาร้อยละผลผลิตของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ (Table 1) พบว่า การห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทริน เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน มีร้อยละผลผลิตเท่ากับร้อยละ 65.51 68.57 และ 72.31-73.89 ตามลำดับ โดยมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน มีปริมาณร้อยละผลผลิตสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ร้อยละ 72.31-73.89 ปริมาณผลผลิตที่สูงของอนุภาคขนาดเล็กที่เป็นผง ซึ่งเป็นผลมาจากการก่อตัวอย่างรวดเร็วของเปลือกแห้ง (drying crust) ช่วยป้องกันไม่ให้ผงเกาะติดที่ผนังถังอบแห้ง (drying chamber) (Escobar-Avello *et al.*, 2021)

การศึกษาประสิทธิภาพการห่อหุ้มผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองอยู่ในช่วงร้อยละ 86.52-89.44 (Table 1) พบว่า ผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองที่ห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงที่สุดคือ ร้อยละ 89.44 เนื่องจากเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่เกิดจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ไซโคลเดกซ์ทรินไกลโคซิลทรานเฟอเรส (cyclodextrin glycosyltransferase) ประกอบด้วยกลูโคส 7 โมเลกุล ที่เชื่อมกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic (Siva *et al.*, 2020) โดยมีโครงสร้างเป็นรูปร่างวงแหวนที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน และกลูโคซิดิกออกซิเจนอยู่ภายในโมเลกุล มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจึงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่เข้ามารวมตัว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น ทำให้มีคุณสมบัติในการกักเก็บสารสำคัญได้ดี (Quan *et al.*, 2020)

Table 1 Yield, encapsulation efficiency, water activity and solubility of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials

Treatments	Yield (%)	EE (%)	a_w	Solubility (%)
MD	65.51 ± 0.97 ^{c**}	86.52 ± 0.22 ^d	0.25 ± 0.01 ^a	84.13 ± 0.68 ^e
β-CD	68.57 ± 1.14 ^b	89.44 ± 0.25 ^a	0.23 ± 0.02 ^{ab}	95.67 ± 0.75 ^a
MD1:β-CD1	72.31 ± 1.24 ^a	88.17 ± 0.10 ^b	0.23 ± 0.01 ^{ab}	88.99 ± 0.41 ^d
MD1:β-CD2	73.89 ± 0.54 ^a	88.20 ± 0.13 ^b	0.22 ± 0.03 ^b	93.88 ± 0.72 ^b
MD2:β-CD1	72.48 ± 0.74 ^a	87.59 ± 0.46 ^c	0.21 ± 0.02 ^b	92.75 ± 0.33 ^c

* Values are given as means ± SD (n=3)

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

MD: Maltodextrin

β-CD: β-cyclodextrin

MD1:β-CD1: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 1:1, (weight/weight)

MD1:β-CD2: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 1:2, (weight/weight)

MD2:β-CD1: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 2:1, (weight/weight)

ในงานวิจัยของ Escobar-Avello *et al.*, (2021) ศึกษากระบวนการไมโครเอนแคปซูลเส้นสารสกัดของสารประกอบฟีนอลิกจากต้นองุ่น ซึ่งละลายในเอทานอลที่อัตราส่วน 30:70 (ปริมาตร/ปริมาตร) ห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินร้อยละ 2.2 (โดยน้ำหนักสารสกัด) ผสมกับมอลโทเดกซ์ทรินที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) พบว่า มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 83.80 ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการห่อหุ้มถึง 2 เท่า และมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงถึงร้อยละ 80.50 Dobroslavić *et al.*, (2023) รายงานว่า ไมโครเอนแคปซูลของสารสกัดฟีนอลิกที่สกัดจากใบกระวาน (*Laurus nobilis* L.) ห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) ในอัตราส่วนสารสกัดต่อสารห่อหุ้ม 1:2 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยใช้เทคนิคทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเข้าที่ 180 องศาเซลเซียส พบว่า มีผลผลิต ความสามารถในการละลาย ปริมาณความชื้น และมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงถึงร้อยละ 78.96, 59.47, 2.51 และ 74.41 ตามลำดับ

กิจกรรมของน้ำอิสระและความสามารถในการละลาย

กิจกรรมของน้ำอิสระที่ต่ำกว่า 0.6 ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร เนื่องจากมีกิจกรรมของน้ำอิสระที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Mahdi *et al.*, 2020; Valková *et al.*, 2022) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดกิจกรรมของน้ำ

อิสระของเห็ดหลินจือผงสำเร็จรูป (มผช. 862/2013) ต่ำกว่า 0.6 (Thai Industrial Standards Institute, 2013) ซึ่งจากการศึกษากิจกรรมของน้ำอิสระของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ พบว่า มีกิจกรรมของน้ำอิสระอยู่ในช่วงระหว่าง 0.21-0.25 ซึ่งจัดว่าอยู่ในเกณฑ์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

ส่วนความสามารถในการละลายของตัวอย่าง ไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเข้าสู่ท้องที่มีการห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน มีความสามารถในการละลายสูงที่สุดที่ร้อยละ 95.67 ($p < 0.05$) (Table 1) ซึ่งกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลต่อการเกิดรูพรุนในโครงสร้างของผงไมโครเอนแคปซูลอีกด้วย

ค่าสี

ผลของชนิดสารห่อหุ้มต่อค่าสี (L^* , a^* , b^* และ ΔE^*) ของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลต การถ่ายเทความร้อนและมวลจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นอัตราการระเหยน้ำของตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินละลายได้ดีกว่าที่มีมอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารห่อหุ้ม (Foo *et al.*, 2020; Pudziuvelyte *et al.*, 2019) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Villela-Castrejón *et al.*, (2017) ที่ทำการศึกษากระบวนการไมโครเอนแคปซูลสารพริกขี้หนู จากของเสียจากโรงงานแปรรูปข้าวโพด (corn wastewater; nejayote) พบว่า การทำแห้งแบบพ่นฝอยทำให้เกิดอนุภาคผงเป็นทรงกลมที่มี

การกระจายของขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารห่อหุ้มที่ใช้ โดยผงที่ได้จากการใช้เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีนเป็นอนุภาคที่มีผิวหน้าเรียบ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าการใช้มอลโทเดกซ์ทรีน จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น สามารถละลายได้ดีกว่า โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.1-80.0 จากเห็ดถึงเชื้อสีทอง (Table 2) พบว่า มีค่าความสว่าง (L^*)

อยู่ในช่วง 74.74-79.20 ซึ่งการห่อหุ้มโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเชื้อสีทองด้วยมอลโทเดกซ์ทรีนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่าความสว่างมีค่าสูงที่สุด ค่าความเป็นสีแดง (a^*) อยู่ในช่วง 7.32-8.65 ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 35.59-41.52 และค่าความต่างของสี (ΔE^*) อยู่ในช่วง 38.94-46.21

Table 2 Color values of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials

Treatments	Color values			
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
MD	79.20 $\pm$ 0.01 ^{a**}	7.32 $\pm$ 0.01 ^d	35.59 $\pm$ 0.01 ^e	38.94 $\pm$ 0.01 ^e
β -CD	75.61 $\pm$ 0.03 ^d	7.57 $\pm$ 0.02 ^c	41.27 $\pm$ 0.01 ^b	45.51 $\pm$ 0.02 ^b
MD1: β -CD1	76.96 $\pm$ 0.02 ^b	8.65 $\pm$ 0.01 ^a	38.29 $\pm$ 0.01 ^d	42.27 $\pm$ 0.02 ^d
MD1: β -CD2	75.92 $\pm$ 0.01 ^c	8.65 $\pm$ 0.01 ^a	40.67 $\pm$ 0.01 ^c	45.07 $\pm$ 0.00 ^c
MD2: β -CD1	74.74 $\pm$ 0.01 ^e	8.25 $\pm$ 0.01 ^b	41.52 $\pm$ 0.01 ^a	46.21 $\pm$ 0.01 ^a

* Values are given as means $\pm$ SD ($n=3$).

** Different with letters (^{a-e}) in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

MD: Maltodextrin

β -CD: β -cyclodextrin

MD1: β -CD1: Maltodextrin mixed with β -cyclodextrin at ratio of 1:1, (weight/weight)

MD1: β -CD2: Maltodextrin mixed with β -cyclodextrin at ratio of 1:2, (weight/weight)

MD2: β -CD1: Maltodextrin mixed with β -cyclodextrin at ratio of 2:1, (weight/weight)

ค่าความสว่าง (L^*) ในไมโครแคปซูลที่มีมอลโทเดกซ์ทรีนสูงกว่าในตัวอย่างที่มีเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างที่มีมอลโทเดกซ์ทรีนเพียงอย่างเดียว (ชนิดเดียว) ส่วนค่าความเป็นสีแดง และความแตกต่างของสีมีค่าต่ำที่สุด ผลจาก (Table 2) แสดงให้เห็นว่า ไมโครแคปซูลที่เตรียมด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีนมีสีแดงเข้มมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอลโทเดกซ์ทรีน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharayei *et al.*, (2020) รายงานว่า การเพิ่มปริมาณของสารห่อหุ้มเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีนและมอลโทเดกซ์ทรีนร้อยละ 5 และ 10 ในกระบวนการไมโครเอนแคปซูลชันสารสกัดจากเปลือกทับทิม (pomegranate peel) ส่งผลให้ค่า L^* และ b^* ของผงไมโครเอนแคปซูลมีค่าเพิ่มขึ้นและการห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรีนจะส่งผลให้มีค่าความสว่าง และค่าความเป็นสีเหลืองสูงกว่าการห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีน ส่วนค่า a^* ของผงไมโครเอนแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรีน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรีน มีค่าลดลง

นอกจากนี้ Sarabandi *et al.*, (2019) รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิเข้าจาก 140 เป็น 170 องศาเซลเซียส ใน

กระบวนการไมโครเอนแคปซูลชันสารสกัดจากเปลือกมะเขือม่วงโดยใช้มอลโทเดกซ์ทรีนร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก) เป็นสารห่อหุ้มที่ผ่านการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยส่งผลทำให้ค่า L^* สูงขึ้น ส่วนค่า a^* และ b^* มีค่าลดลง ดังนั้นอุณหภูมิเข้าในการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยจึงมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเชื้อสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ (Table 3) พบว่า มีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงร้อยละ 2.19-2.41 ซึ่งตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขในผลิตภัณฑ์โปรตีนจากเมล็ดถั่วเหลือง ฉบับที่ 425/2021 กำหนดให้มีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก) จัดว่าความชื้นของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเชื้อสีทองอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (Ministry of Public Health, 2021) ส่วนปริมาณไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถึงเชื้อสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.56-0.72 0.15-0.45 และ

80.17-84.55 ตามลำดับ นอกจากนี้มีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 12.31-16.75 พบว่า ตัวอย่างที่มีการห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:2 มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 16.75

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพในการห่อหุ้มจะแปรผกผันกับปริมาณโปรตีนในตัวอย่างจะเห็นว่า การห่อหุ้มโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินเพียงตัวเดียวมีค่ามีประสิทธิภาพในการห่อหุ้มที่สูง (Table 1) จึงทำให้มีกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ในอัตราที่มากส่งต่อปริมาณโปรตีนในตัวอย่างมีปริมาณน้อยกว่าตัวอย่างที่มีการห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรินเพียงตัวเดียว ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพใน

การห่อหุ้มน้อยกว่า หรือมีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ในการห่อหุ้มโปรตีนได้น้อยทำให้มีปริมาณโปรตีนที่วัดได้มีค่าสูง จะเห็นได้ว่า ชนิดและอัตราส่วนที่ต่างกันของสารห่อหุ้มมีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพของการทำแห้งหรือปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องในการกำหนดคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่เป็นผง เนื่องจากปริมาณความชื้นที่สูงอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเหนียวในอนุภาคของผลิตภัณฑ์ (Pudziuvelyte et al., 2020) มอลโทเดกซ์ทริน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินที่ใช้เป็นสารห่อหุ้มในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติช่วยป้องกันการดูดความชื้นกลับได้ดี

Table 3 Chemical composition of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials

Treatments	Moisture (%)	Fat (%)	Ash (%)	Protein (%)	Carbohydrate (%)
MD	2.41 ± 0.06 ^{a**}	0.69 ± 0.03 ^a	0.19 ± 0.02 ^c	12.31 ± 0.36 ^d	84.55 ± 0.39 ^a
β-CD	2.26 ± 0.01 ^{bc}	0.58 ± 0.06 ^b	0.32 ± 0.03 ^b	13.78 ± 0.26 ^c	83.03 ± 0.27 ^b
MD1:β-CD1	2.30 ± 0.02 ^b	0.56 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.04 ^c	15.60 ± 0.30 ^b	81.35 ± 0.31 ^c
MD1:β-CD2	2.23 ± 0.02 ^{cd}	0.70 ± 0.03 ^a	0.15 ± 0.04 ^c	16.75 ± 0.43 ^a	80.17 ± 0.41 ^d
MD2:β-CD1	2.19 ± 0.03 ^d	0.72 ± 0.07 ^a	0.45 ± 0.05 ^a	15.46 ± 0.17 ^b	81.18 ± 0.29 ^c

* Values are given as means ± SD (n=3).

** Different with letters (^{a-d}) in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

MD: Maltodextrin

β-CD:β-cyclodextrin

MD1:β-CD1: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 1:1, (weight/weight)

MD1:β-CD2: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 1:2, (weight/weight)

MD2:β-CD1: Maltodextrin mixed with β-cyclodextrin at ratio of 2:1, (weight/weight)

ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ (Figure 2) พบว่า การห่อหุ้มโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองด้วยมอลโทเดกซ์ทริน เบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทริน มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 90.77-101.45 mg GAE/g sample โดยการห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินเพียงตัวเดียวมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 101.45 mg GAE/g sample แต่ไม่แตกต่างจากการห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:2 และ 2:1 ที่มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 99.64 และ 99.45 mg GAE/g sample ตาม

ลำดับ ($p > 0.05$)

Sharayei et al., (2020) รายงานว่า ไมโครเอนแคปซูลสารสกัดจากเปลือกทับทิมที่ห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทริน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ในอัตราส่วนสารสกัดต่อสารห่อหุ้ม 1:5 ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า การห่อหุ้มสารสกัดจากเปลือกทับทิมด้วยมอลโทเดกซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 เท่ากับ 23.75 และ 51.58 mg GAE/g sample ตามลำดับ ส่วนการห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 เท่ากับ 54.96 และ 58.78 mg GAE/g sample ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกของสารสกัดจากเปลือกทับทิมลดลงจากเริ่มต้นที่ 60.19 mg GAE/g sample

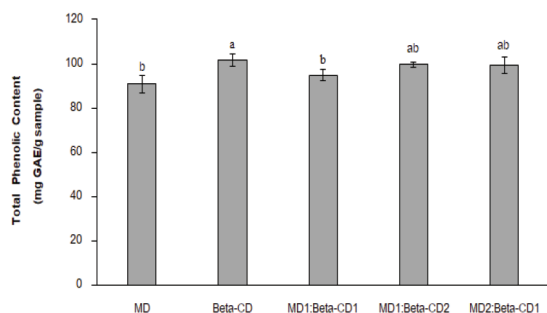


Figure 2 Total phenolic content of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials. Values are expressed as means $\pm$ SD ($n=3$). Different lowercase letters indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาการดักจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอน และไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีความคงตัวที่เสถียรมากขึ้น เมื่อสารละลายอนุมูลอิสระ DPPH ทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระทำให้เปลี่ยนอยู่ในรูปของสารสีจาง ซึ่งจะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง ส่วนกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS เกิดจากการออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตให้เป็นอนุมูลอิสระ โดยเปลี่ยนสีจากเขียวแกมน้ำเงินเป็นสีที่จางลง

กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองโดยใช้สารห่อหุ้มชนิดต่าง ๆ พบว่า มีค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Figure 3) และ ABTS (Figure 4) อยู่ในช่วง 272.49-284.95 และ 1,472.38-1,536.49 $\mu\text{mol Trolox equivalent/g sample}$ ตามลำดับ การห่อหุ้มโปรตีนไอโซเลตจากเห็ดถั่งเช่าสีทองด้วยสารผสมของมอลโทเดกซ์ทริน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินสามารถช่วยป้องกันการสูญเสียฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มเพียงชนิดเดียว เนื่องด้วยมอลโทเดกซ์ทริน และเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินมีจุดหลอมเหลวที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีคุณสมบัติที่ทนต่อความร้อนได้สูง (Ćujić Nikolić *et al.*, 2023) จึงช่วยรักษาสารสำคัญในระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเข้า 180 องศาเซลเซียส โดยอัตราส่วนในการห่อหุ้มด้วยมอลโทเดกซ์ทรินต่อเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินที่อัตราส่วน 2:1 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดที่ 284.95 $\mu\text{mol Trolox equivalent/g}$

sample และอัตราส่วน 1:2 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS สูงสุดที่ 1,536.49 $\mu\text{mol Trolox equivalent/g sample}$

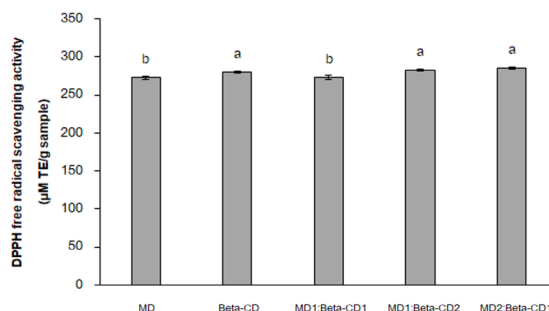


Figure 3 DPPH radical scanning activities of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials. Values are expressed as means $\pm$ SD ($n=3$). Different lowercase letters indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

Dobroslavić *et al.*, (2023) รายงานว่าไมโครเอนแคปซูลฟีนอลิกที่สกัดจากใบกระวานห่อหุ้มด้วยเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินและมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 162.18 และ 201.43 $\mu\text{mol TE g}^{-1}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ Ćujić Nikolić *et al.*, (2023) ศึกษาไมโครเอนแคปซูลสารประกอบฟีนอลิกจากของเสียในการแปรรูปข้าวโพดด้วยสารห่อหุ้มมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินอัตราส่วนร้อยละ 15:15 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) พบว่า กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ABTS เท่ากับ 58.37 mmol Trolox eq/kg ($p>0.05$)

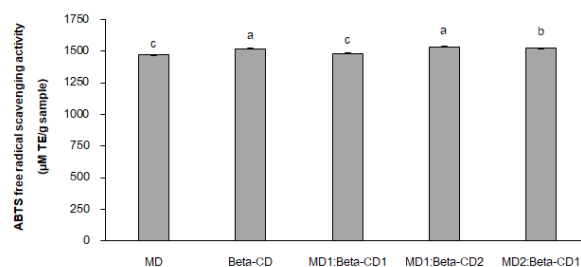


Figure 4 ABTS radical scanning activities of microencapsulated protein isolate from *Cordyceps militaris* using different types of wall materials. Values are expressed as means $\pm$ SD ($n=3$). Different lowercase letters indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

สรุปผลการทดลอง

ผงไมโครเอนแคปซูลโปรตีนไฮโดรไลต์จากเห็ดถั่งเช่าสีทองด้วยมอลโทเดกซ์ทรินผสมกับเบต้า-ไซโคลเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 1:2 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) เป็นกระบวนการห่อหุ้มด้วยเทคนิคไมโครเอนแคปซูลชั้นที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีลักษณะปรากฏที่เป็นผงเนียนละเอียด มีสีที่ดีตามธรรมชาติของเห็ดถั่งเช่าสีทอง อีกทั้งยังมีร้อยละผลผลิต ปริมาณโปรตีน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 เลขสัญญาทุน มจ.1-65-046.2 ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้ รวมถึงสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร และสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Akbarbaglu, Z., Peighambaroust, S. H., Sarabandi, K., & Jafari, S. M. (2021). Spray drying encapsulation of bioactive compounds within protein-based carriers; different options and applications. *Food Chemistry*, 359, 129965.
- AOAC, (2000). *Official methods of analysis of AOAC international*. Association of Official Analytical Chemists.
- Binsan, W., Benjakul, S., Visessanguan, W., Roytrakul, S., Tanaka, M., & Kishimura, H. (2008). Antioxidative activity of Mungoong, an extract paste, from the cephalothorax of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Food Chemistry*, 106(1), 185-193.
- Ćujić Nikolić, N., Žilić, S., Simić, M., Nikolić, V., Živković, J., Marković, S., & Šavikin, K. (2023). Microencapsulates of blue maize polyphenolics as a promising ingredient in the food and pharmaceutical industry: characterization, antioxidant properties, and in vitro-simulated digestion. *Foods*, 12(9), 1870.
- Derbyshire, E. J., & Delange, J. (2021). Fungal protein-what is it and what is the health evidence? A systematic review focusing on mycoprotein. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 581682.
- Dobrosłavić, E., Elez Garofulić, I., Zorić, Z., Pedisić, S., Roje, M., & Dragović-Uzelac, V. (2023). Physicochemical properties, antioxidant capacity, and bioavailability of *Laurus nobilis* L. Leaf polyphenolic extracts microencapsulated by spray drying. *Foods*, 12(9), 1923.
- Escobar-Avello, D., Avendaño-Godoy, J., Santos, J., Lozano-Castellón, J., Mardones, C., von Baer, D., Luengo, J., Lamuela-Raventós, R. M., Vallverdú-Queralt, A., & Gómez-Gaete, C. (2021). Encapsulation of phenolic compounds from a grape cane pilot-plant extract in hydroxypropyl beta-cyclodextrin and maltodextrin by spray drying. *Antioxidants*, 10(7), 1130.
- Flores, F., & Caro, M. (2022). Physicochemical, antioxidant, and enzyme inhibitory properties of Bignay (*Antidesma bunius* L. Spreng) and Duhat (*Syzygium cumini* L.) extracts microencapsulated with-cyclodextrin. *Food Research International*, 6, 283-288.
- Foo, S. C., Khong, N. M., & Yusoff, F. M. (2020). Physicochemical, microstructure and antioxidant properties of microalgae-derived fucoxanthin rich microcapsules. *Algal Research*, 51, 102061.
- Ghorbanzade, T., Akhavan-Mahdavi, S., Kharazmi, M. S., Ibrahim, S. A., & Jafari, S. M. (2022). Loading of fish oil into β -cyclodextrin nanocomplexes for the production of a functional yogurt. *Food Chemistry*, 15, 100406.
- Grgić, J., Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., & Bucić-Kojić, A. (2020). Role of the encapsulation in bioavailability of phenolic compounds. *Antioxidants*, 9(10), 923.
- Jafari, S. M., Vakili, S., & Dehnad, D. (2019). Production of a functional yogurt powder fortified with nanoliposomal vitamin D through spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1220-1231.
- Kosasu, T., Wongklom, A., & Moonsin, P. (2015). Total phenolics, flavonoids and antioxidant activity of fresh water macroalgae from Ubon Ratchathani, Thailand. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*, 1, 207-210.
- Loksuwan, J. (2007). Characteristics of micro-encapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin. *Food Hydrocolloids*, 21(5-6), 928-935.

- Mahdi, A. A., Mohammed, J. K., Al-Ansi, W., Ghaleb, A. D., Al-Maqtari, Q. A., Ma, M., & Wang, H. (2020). Microencapsulation of fingered citron extract with gum arabic, modified starch, whey protein, and maltodextrin using spray drying. *International Journal of Biological Macro-molecules*, 152, 1125-1134.
- Maqsoudlou, A., Mahoonak, A. S., Mohebodini, H., & Koushki, V. (2020). Stability and structural properties of bee pollen protein hydrolysate microencapsulated using maltodextrin and whey protein concentrate. *Heliyon*, 6(5), e03731.
- Ministry of Public Health. (2021). *Notification of the Ministry of Public Health. Protein from hemp seeds*. <https://ockt.dtam.moph.go.th>.
- Mohammed, N. K., Tan, C. P., Manap, Y. A., Muhialdin, B. J., & Hussin, A. S. M. (2020). Spray drying for the encapsulation of oils-A review. *Molecules*, 25(17), 3873.
- Phull, A.-R., Ahmed, M., & Park, H.-J. (2022). *Cordyceps militaris* as a bio functional food source: pharmacological potential, anti-inflammatory actions and related molecular mechanisms. *Microorganisms*, 10(2), 405.
- Pudziulyte, L., Marksa, M., Jakstas, V., Ivanauskas, L., Kopustinskiene, D. M., & Bernatoniene, J. (2019). Microencapsulation of *Elsholtzia ciliata* herb ethanolic extract by spray-drying: impact of resistant maltodextrin complemented with sodium caseinate, skim milk, and beta-cyclodextrin on the quality of spray-dried powders. *Molecules*, 24(8), 1461.
- Pudziulyte, L., Marksa, M., Sosnowska, K., Winnicka, K., Morkuniene, R., & Bernatoniene, J. (2020). Freeze-drying technique for microencapsulation of *Elsholtzia ciliata* ethanolic extract using different coating materials. *Molecules*, 25(9), 2237.
- Quan, W., He, W., Qie, X., Chen, Y., Zeng, M., Qin, F., Chen, J. & He, Z. (2020). Effects of β -cyclodextrin, whey protein, and soy protein on the thermal and storage stability of anthocyanins obtained from purple-fleshed sweet potatoes. *Food chemistry*, 320, 126655.
- Robinson, H. W. & Hogden, C. G. 1940. The biuret reaction in the determination of serum proteins. 1. A study of the conditions necessary for the production of a stable color which bears a quantitative relationship to the protein concentration. *Journal of Biological Chemistry*, 135. 707-725.
- Sarabandi, K., Gharehbeglou, P., & Jafari, S. M. (2020). Spray-drying encapsulation of protein hydrolysates and bioactive peptides: Opportunities and challenges. *Drying Technology*, 38(5-6), 577-595.
- Sarabandi, K., Jafari, S. M., Mahoonak, A. S., & Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59-68.
- Sharayei, P., Azarpazhooh, E., & Ramaswamy, H. S. (2020). Effect of microencapsulation on antioxidant and antifungal properties of aqueous extract of pomegranate peel. *Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 723-733.
- Siva, S., Li, C., Cui, H., Meenatchi, V., & Lin, L. (2020). Encapsulation of essential oil components with methyl- β -cyclodextrin using ultrasonication Solubility characterit, DPPH and antibacterial assay. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 104997.
- Suyalek, S., Jaturonglumlert, S., Amornlerdpison, D., Narkprasom, N., & Narkprasom, K. (2020). Encapsulation of crude extracts from Banana (*Musa X paradisca*) flowers by spray drying. *Burapha Science Journal*, 25(2), 448-463.
- Takeungwongtrakul, S., & Benjakul, S. (2017). Effect of glucose syrup and fish gelatin on physicochemical properties and oxidative stability of spray-dried microencapsulated shrimp oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12876.
- Thai Industrial Standards Institute. (2013). *Thai community products standards. Instant Lingzhi or reishi drink*. https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0862_56 (Instant Lingzhi or reishi drink). pdf.
- Valková, V., Ďúranová, H., Falcimaigne-Cordin, A., Rossi, C., Nadaud, F., Nesterenko, A., & Kačániová,

- M. (2022). Impact of freeze-and spray-drying micro-encapsulation techniques on β -glucan powder biological activity: A comparative study. *Foods*, 11(15), 2267.
- Villela-Castrejón, J., Acosta-Estrada, B. A., & Gutiérrez-Uribe, J. A. (2017). Micro-encapsulation of corn wastewater (nejayote) phytochemicals by spray drying and their release under simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Food Science*, 82(7), 1726-1734.
- Wu, H. C., Chen, H. M., & Shiau, C. Y. (2003). Free amino acids and peptides as related to antioxidant properties in protein hydrolysates of mackerel (*Scomber austriasicus*). *Food Research International*, 36(9-10), 949-957.
- Yang, Q., Yin, Y., Yu, G., Jin, Y., Ye, X., Shrestha, A., Liu, W., Yu, W., & Sun, H. (2015). A novel protein with anti-metastasis activity on 4T1 carcinoma from medicinal fungus *Cordyceps militaris*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 80, 385-391.
- Yu, X. Y., Zou, Y., Zheng, Q. W., Lu, F. X., Li, D. H., Guo, L. Q., & Lin, J. F. (2021). Physicochemical, functional and structural properties of the major protein fractions extracted from *Cordyceps militaris* fruit body. *Food Research International*, 142, 110211.
- Zhang, D. q., Mu, T. h., Sun, H. n., Chen, J. w., & Zhang, M. (2017). Comparative study of potato protein concentrates extracted using ammonium sulfate and isoelectric precipitation. *International Journal of Food Properties*, 20(9), 2113-2127.

การเจริญเติบโตและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายใต้แสงเทียมและการพัฒนาสารเคลือบบริโภคได้จากสารสกัดกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูร

Growth and bioactives content of *Dendrobium friedericksianum* Rchb.f. under artificial lights and development of edible coating from an extract

พรพรรณ สุขุมพินิจ^{1*}, หยาดรุ้ง สุวรรณรัตน์² และ วริศชนม์ นิลนนท์²

Pornpan Sukhumpinij^{1*}, Yardrung Suwannarat¹ and Waritchon Ninlanon²

Received: 19 July 2023; Revised: 5 September 2023; Accepted: October 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูรโดยนำกล้วยไม้อายุ 1 ปี มาเลี้ยงภายใต้แสง LEDs ที่แตกต่างกัน จากนั้นนำสารสกัดลำลูกกล้วยกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูรไปศึกษาสารเคลือบบริโภคได้ ผลการศึกษาการเลี้ยงกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูรภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกันเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตทางด้านความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำลูกกล้วยไม้แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อนำลำลูกกล้วยของกล้วยไม้อายุ 7 เดือน ภายหลังการเลี้ยงด้วยแสงสีต่างๆ มาวิเคราะห์คุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่าค่า IC_{50} ของสารสกัดกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีม่วงมีค่าต่ำกว่าสารสกัดจากกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณฟีนอลรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมที่พบปริมาณสูงที่สุดในสารสกัดที่เลี้ยงด้วยแสงสีม่วง แสดงถึงแนวโน้มที่ดีในการเลี้ยงกล้วยไม้ภายใต้แสง LEDs เพื่อควบคุมปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ต้องการได้เมื่อเทียบกับการปลูกในธรรมชาติ ส่วนการศึกษาสารเคลือบบริโภคได้จากสารสกัดกล้วยไม้ ทำการศึกษาการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยไข่และมะนาว พบว่าการใช้สารเคลือบให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยการใช้สารเคลือบมีแนวโน้มช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยไข่และมะนาว และมีแนวโน้มช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ ความหวาน ความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรดของกล้วยไข่ ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรสารเคลือบกล้วยไข่และมะนาวต่อไป

คำสำคัญ: แสง LEDs, เหลืองจันทร์บูร, ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ, สารเคลือบผิว, สารเคลือบบริโภคได้

Abstract

The purpose of this research was to study the growth and bioactive compounds of one-year-old *Dendrobium friedericksianum* Rchb.f. cultured under different LEDs light conditions. The pseudobulb of orchid extracts was used to study edible coatings. No significant differences of plant height and diameter were found when culturing under different LEDs light conditions for 6 months. The analysis of bioactive compounds from the pseudobulb of *Dendrobium friedericksianum* Rchb.f. incubated under different light conditions for 7 months found that the IC_{50} value of extract of orchid grown under purple light was statistically significantly lower than that of other light colors, corresponding to the total phenolic content of orchid extracts and the total flavonoid content from the orchids extracts from the purple light cultured. The results for culturing orchids under the LEDs to control the required amount of active ingredient were

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี 22000

² รองศาสตราจารย์, คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี 22000

¹ Assistant. Profersor., Faculty of Agricultural Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000

² Associate. Profersor., Faculty of Agricultural Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000

* Corresponding author; Pornpan Sukhumpinij, Faculty of Agricultural Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi 22000.

Email: pompan.s@rbru.ac.th

generally better compared to the natural planting. Edible coatings were studied from orchid extracts with the objective of finding ways to delay changes in quality and to extend the shelf life of Kluai Khai and lime. It was found that there were no significant differences for the application of coating agent to delay the color change of Kluai Khai and lime, and delay changes in firmness, sweetness, pH value and the acid content of Kluai Khai. This information provides guidelines for further development of Kluai Khai and lime of coating formulations in future.

Keywords : LEDs light, *dendrobium fredericksianum* Rchb.f., antioxidant activity, coating, edible coating

บทนำ

กล้วยไม้เหลืงจันทบุรี (*dendrobium fredericksianum* Rchb.f.) เป็นดอกไม้ประจำจังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จันทบุรี และตราด เป็นกล้วยไม้อิงอาศัย มีลักษณะของลำลูกกล้วยรูปทรงกระบอก ใบรูปไข่ เป็นกล้วยไม้ที่มีค่าทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ดอกของกล้วยไม้เหลืงจันทบุรีมีลักษณะเป็นดอกเดี่ยว ออกตามข้อเกือบตลอดทั้งลำ กลีบดอกสีเหลืองสดเป็นมัน อาจะมีแต้มสีม่วงแดงบริเวณโคนกลีบปาก หรือไม่มีแต้มเลย (อบจันท์ ไทยทอง, 2549) ประโยชน์ของกล้วยไม้สกุลนี้ นอกจากเป็นไม้ประดับแล้ว ยังสามารถนำส่วนต่างๆ มาใช้ทางยาได้ ประเทศจีนเป็นประเทศแรกที่มีการเพาะปลูกกล้วยไม้และนำมาใช้เป็นยาสมุนไพร สำหรับตำรับยาสมุนไพรกล้วยไม้สกุลหวายที่รู้จักอย่างแพร่หลายคือ สีอ-หู่ (Shi-Hu) ซึ่งประกอบด้วย *Dendrobium* หลายชนิด เช่น *D. nobile*, *D. loddigesii*, *D. fimbriatum*, *D. chrysanthum* และ *D. candidum* ซึ่งมีข้อบ่งใช้ตามตำรับยา Chinese Pharmacopoeia ในการรักษาโรคต่างๆ เช่น โรคตับ โรคไต บำรุงกระเพาะอาหาร แก้อาการปวด ลดไข้ ลดบวม เป็นต้น (Hossain, 2011) นิสา จุลโพธิ์ (2559) ทำการศึกษาสารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวาย 4 ชนิด พบว่า กล้วยไม้สายพันธุ์เอื้องสกุล สายพันธุ์เจสสิก้า สายพันธุ์บุษราคัม และสายพันธุ์ขาว 5 เอ็น พบสารฟลักซ์เคมีหลายชนิด ได้แก่ เทอร์พีนอยด์ สเตียรอยด์ คาร์ดิแอกไกลโคไซด์ ฟลาโวนอยด์ แทนนิน และคูมาริน จากการศึกษาข้างต้น สารสกัดกล้วยไม้สกุลหวายสายพันธุ์ต่าง ๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางยา หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ ดังนั้นจึงควรนำมาสืบค้นวิจัยเพื่อพัฒนาศักยภาพในการผลิต เพื่อเพิ่มมูลค่า และสร้างช่องทางการตลาดใหม่ๆ เพิ่มมากขึ้น

แสงที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อการเจริญเติบโต สร้างใบ ดอก และผล คือ แสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น (Visible light) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 380-770 นาโนเมตร แต่จะมีช่วงแสงเฉพาะที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ที่เรียกว่า Photo synthetically active radiation (PAR) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ซึ่งสำคัญมากต่อพืชในการใช้พลังงานเพื่อสังเคราะห์ด้วยแสง มีการศึกษาการใช้แสงเทียมด้วยแสงจากหลอด LEDs เพื่อเพิ่ม

ศักยภาพในการผลิตกล้วยไม้ โดยสัดส่วนของแสงสีแดงและสีน้ำเงินของหลอดไฟ LEDs สามารถเพิ่มการสะสมของแอนโทไซยานินและฟลาโวนอยด์ได้ และเพิ่มการผลิต Plant secondary metabolites ได้อีกด้วย นอกจากสัดส่วนของแสงสีแดงและสีน้ำเงินยังพบว่า แสงสีเขียว สีเหลือง หรือการผสมระหว่างแสงสีแดงและแสงสีขาว สามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้นด้วย (Hasan et al., 2017) จิตราพรรณ พิสิข (2550) ใช้หลอดแอลอีดีเพื่อทดแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้ พบว่าการใช้หลอดแอลอีดีสีแดง 90 เปอร์เซ็นต์ และสีน้ำเงิน 10 เปอร์เซ็นต์ ช่วยในการพัฒนาต้นกล้าจนช่อดอกได้สูงกว่าการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ และช่วยเพิ่มจำนวนเนื้อเยื่อมากกว่า 2.5 เท่า และในการเลี้ยงต้นกล้าขนาดเล็กในสภาพปลอดเชื้อเป็นเวลา 120 วัน ทำให้ต้นกล้ามีน้ำหนักสด และความสูงมากกว่าต้นกล้าที่เลี้ยงด้วยแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์อย่างมีนัยสำคัญ วันทนา สมบูรณ์ทรัพย์ และคณะ (2558) ทำการศึกษาไดโอดเปล่งแสง (LEDs) ต่อการเพิ่มจำนวนของโปรโตคอร์มไลต์บอดี (PLBs) ของกล้วยไม้สกุลหวายไซเนียเอื้องสกุลในสภาพปลอดเชื้อ พบว่า PLBs ที่เลี้ยงภายใต้แสงสีแดงจากหลอด LEDs มีน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงที่สุด โดยมีจำนวน PLBs เพิ่มขึ้นมากกว่าแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 28.6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการปลูกเลี้ยงกล้วยไม้เหลืงจันทบุรีภายใต้สภาพแสงสีต่างๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิต และศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของกล้วยไม้เหลืงจันทบุรี ซึ่งกล้วยไม้สกุลหวายเป็นพืชที่พบว่ามีสารฟลักซ์เคมีต่างๆ จำนวนมาก และมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระรวมสูง และพบว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบ และมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันได้ (นิสา จุลโพธิ์, 2559 ; วาสนา ประภาเลิศ และคณะ, 2561) ดังนั้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางยาหรือเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางได้ หรือการนำสารสกัดมาใช้ประโยชน์อย่างเช่น สารเคลือบบริโภคได้ทดแทนบรรจุภัณฑ์จากพลาสติก ในปัจจุบันพบว่าบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกเป็นปัญหาสำคัญ และมีผลกระทบต่อผู้บริโภค เนื่องจากมีสารที่ก่อมะเร็งปลดปล่อยออกมาเมื่อ

และผิวหุ้ม การใช้ฟิล์ม สารเคลือบที่บริโภคได้ ทำได้ ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การห่อหุ้ม การจุ่ม การแปรง หรือการ พ่นฝอย เพื่อป้องกันการระเหยของก๊าซ และความคุ้มครองการ แลกเปลี่ยนเข้าออกของก๊าซจากอาหารที่ห่อหุ้ม ซึ่งฟิล์มของสาร เหล่านี้ทำหน้าที่ขวางกั้นสารละลาย ก๊าซ ความชื้น สามารถ ชะลออัตราการหายใจ การสูญเสีย น้ำ ยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปณณท์, 2562)

ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาค้นคว้าเพื่อศึกษาการ เจริญเติบโตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของกล้วยไม้หลอดจันทบูร ภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน และนำสารสกัดจากกล้วยไม้หลอด จันทบูรไปศึกษาสารเคลือบบริโภคได้ต่อไป

การทดลอง

1. การศึกษาการเจริญเติบโตของกล้วยไม้หลอดจันทบูร ภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน

มีการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) แบ่งการทดลองออกเป็น 4 สิ่ง ทดลองๆ ละ 10 ซ้ำๆ ละ 1 ต้น โดยกำหนดการเลี้ยงในสภาพ แสงที่แตกต่างกันดังนี้คือ สิ่งทดลองที่ 1 แสงสีขาว, สิ่งทดลอง ที่ 2 แสงสีส้ม (LEDs อัตราส่วน Warm white 165 ดวง : Red 60 ดวง), สิ่งทดลองที่ 3 แสงสีม่วง (LEDs อัตราส่วน Red 165 ดวง : Blue 60 ดวง) และสิ่งทดลองที่ 4 แสงชมพู (LEDs อัตราส่วน Red 77 ดวง : Blue 44 ดวง : Orange 77 ดวง : White 24 ดวง) ตามลำดับ ดำเนินการทดลองโดยทำการ เติบโตกล้วยไม้หลอดจันทบูรอายุ 1 ปี มีความสูงเฉลี่ยเริ่มต้น 10.50 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำลูกกล้วย เฉลี่ยเริ่มต้น 0.55 เซนติเมตร และมีจำนวนใบเฉลี่ยเริ่มต้น 5.40 ใบ จากนั้นนำกล้วยไม้หลอดจันทบูรไปเลี้ยงภายใต้ สภาพแสงสีต่างๆ สังเกตและบันทึกผลการเจริญเติบโตของ กล้วยไม้หลอดจันทบูร โดยวัดความสูง, ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของลำลูกกล้วย และจำนวนใบของกล้วยไม้หลอด จันทบูร นำข้อมูลทางความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ทุก 1 เดือน นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม SPSS version 22 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) กำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติ $p \leq 0.05$

2. การศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของกล้วยไม้หลอดจันทบูร

2.1 การเตรียมตัวอย่างการสกัดสารจากลำลูกกล้วยกล้วยไม้

นำส่วนลำลูกกล้วยของกล้วยไม้หลอดจันทบูรได้จากการเลี้ยงภายใต้สภาพแสงสีต่างๆ เป็นระยะเวลา 7 เดือน มา อบแห้งและบด จากนั้นสกัดด้วยวิธีอัลตราโซนิก (Prommajak *et al.*, 2014) โดยชั่งตัวอย่างบดแห้งของกล้วยไม้ปริมาณ 5.0 กรัม เติมน้ำกลั่นละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 60 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปสกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่ ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) เป็นเวลา 10 นาที กรอง สารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.1) สกัดซ้ำ อีก 2 ครั้ง โดยเติมน้ำกลั่นละลายในปริมาณเท่าเดิม และสกัด ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นนำสารละลายที่สกัดได้ประหย ะจนแห้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (evaporator) จะได้สาร สกัดแห้งของต้นกล้วยไม้ บันทึกน้ำหนักของ สารสกัดแห้ง ที่ได้

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม ดัดแปลงตามวิธีของ Chidambara *et al.*, (2002) นำสาร สกัดต้นกล้วยไม้หลอดจันทบูรปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงในหลอด ทดลอง เติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร และเติมสาร Folin-Ciocalteu ปริมาณ 0.25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่า เก็บไว้ในที่มืดนาน 10 นาที เติมน้ำกลั่นละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ตั้งไว้ในที่มืด เพื่อให้สารทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการ ดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำค่าการดูดกลืนแสงที่ ได้มาคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยเปรียบเทียบกับ จากสมการกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก บันทึกผลปริมาณสาร ประกอบฟีนอลิกรวมเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิก ต่อกรัมสารสกัดแห้ง

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์รวม

หาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium trichloride ($AlCl_3$) colorimetric โดยใช้เคอร์ซิติน (quercetin) เป็นสารมาตรฐาน เตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์ซิตินความ เข้มข้น 0.002-0.016 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปิเปตสารสกัด จากลำลูกกล้วยกล้วยไม้ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 2

มิลลิลิตร และอะลูมิเนียมไตรคลอไรด์ (AlCl_3 reagent) ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่า บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำมารองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานของเคอร์ซีดิน บันทึกผลปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมเป็นไมโครกรัมสมมูลเคอร์ซีดินต่อกรัมสารสกัดหยาบ

2.4 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging ดัดแปลงจากวิธีของ Singhatong *et al.*, (2010) โดยเตรียมตัวอย่างสารสกัดกล้วยไม้เหลืองจันทบุรีที่ความเข้มข้น 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปิเปตสารสกัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองเติมสารละลาย DPPH radical scavenging ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร พร้อมกับทำหลอดควบคุมโดยใช้น้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันแล้วไปตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH โดยมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

ร้อยละการยับยั้ง = $[(A \text{ control} - A \text{ sample}) / A \text{ control}] \times 100$

โดย A sample = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ

และ A Control = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

นำค่าร้อยละการยับยั้ง ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ มาสร้างกราฟเพื่อคำนวณหา IC_{50} เมื่อค่า IC_{50} คือความเข้มข้นของสารสกัดที่ร้อยละการยับยั้งลดลง ร้อยละ 50

3. การเตรียมตัวอย่างสำหรับเคลือบผิว

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ กล้วยไข่ และมะนาว คัดเลือกกล้วยไข่สายพันธุ์กำแพงเพชร จากสวนผลไม้ในจังหวัดจันทบุรี โดยมีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 60 วัน (นับจากแทงปลี) ผลสีเขียวไม่มีตำหนิปราศจากโรคและแมลง ส่วนมะนาวใช้มะนาวแป้นพิจิตร ชื่อจากตลาดผลไม้ อำเภอเมืองจันทบุรี คัดเลือกเฉพาะผลที่มีสีเขียวมีความสม่ำเสมอ นำวัตถุดิบจุ่มลงในสารละลายคลอรีนเข้มข้น 50 ppm นาน 5 นาที เพื่อยับยั้งการเกิดเชื้อโรคภายหลังการเก็บเกี่ยว ผึ่งให้แห้งเพื่อเตรียมสำหรับเคลือบสารสกัดในขั้นตอนต่อไป

3.1 การเคลือบสารเคลือบผิว

การทดลองสารเคลือบผิวมีทั้งหมด 5 สิ่งทดลอง คือ สิ่งทดลองที่ 1 ไม่ชุบสารเคลือบผิว (ควบคุม) สิ่งทดลองที่ 2 สารเคลือบผิวซึ่งไม่มีส่วนผสมของสารสกัดจากกล้วยไม้ สิ่งทดลองที่ 3 สารเคลือบผิวที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากกล้วยไม้ 0.5 % สิ่งทดลองที่ 4 สารเคลือบผิวที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากกล้วยไม้ 1.0% และสิ่งทดลองที่ 5 สารเคลือบผิวที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากกล้วยไม้ 1.5% นำกล้วยไข่และมะนาวที่เตรียมไว้จุ่มลงในสารเคลือบผิวให้ทั่วถึง จากนั้นนำผึ่งให้แห้ง และบรรจุในภาชนะกล่องกระดาษลูกฟูก เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $70 \pm 5\%$ เป็นเวลา 7 วัน โดยสุ่มตัวอย่างทุกวัน ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ และนำวิเคราะห์คุณภาพทุกวันเป็นระยะเวลา 7 วัน ดังนี้

1. การสูญเสียน้ำหนัก นำแต่ละสิ่งทดลองซึ่งน้ำหนักเริ่มต้น และเก็บตัวอย่าง นำออกมาชั่งน้ำหนักทุกวันเพื่อวิเคราะห์ผล แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย = $[(\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนัก ณ วันที่ตรวจผล}) \times 100 \div \text{น้ำหนักเริ่มต้น}]$

2. การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลวัสดุผิว โดยใช้เครื่องวัดสี Chroma meter ซึ่งค่าที่ได้แสดงออกมา เป็นค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) ค่าความสว่างของสี (L^*) เมื่อค่า L มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง ผลิตผลมีผิวคล้ำ ถ้าเข้าใกล้ 100 แสดงว่ามีความสว่าง ค่าความเป็นสีเขียว (a^*) มีค่าอยู่ระหว่าง -60 ถึง +60 เมื่อมีค่าเป็นลบ แสดงว่า ผลิตผลมีสีเขียว หากเป็นบวก แสดงว่าผลิตผลมีสีแดง ถ้าค่า a^* ต่ำมาก แสดงว่าผลิตผลมีสีเขียว ส่วนค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าอยู่ระหว่าง -60 ถึง +60 เมื่อมีค่าเป็นลบ แสดงว่าผลิตผลมีสีน้ำเงิน หากเป็นบวก แสดงว่าผลิตผลมีสีเหลือง หากมีค่าสูงมาก แสดงว่าผลิตผลมีสีเหลือง

3. การวิเคราะห์คุณภาพกายภาพและเคมี

3.1 การวัดความแน่นแข็ง (texture) โดยนำตัวอย่างวัดความแน่นเนื้อ ด้วยเครื่อง Penetrometer หน่วยเป็น Kg/cm^2

3.2 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ด้วย pH meter

3.3 ค่าความเป็นกรด (% Total acidity)

3.4 ค่าความหวาน (% Brix) ด้วย Hand refractometer

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกล้วยไม้เลี้ยงจันทบูรภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาการเลี้ยงกล้วยไม้หวายจันทบูรภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกันคือ แสงฟลูออเรสเซนต์สีขาว, แสงสีส้ม LEDs อัตราส่วน Warm white 165 ดวง : Red 60 ดวง, แสงสีม่วง LEDs อัตราส่วน Red 165 ดวง : Blue 60 ดวง และแสงสีชมพู LEDs อัตราส่วน Red 77 ดวง : Blue 44 ดวง : Orange 77 ดวง : White 24 ดวง เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า การเจริญเติบโตทางด้านความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำกล้วยไม้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วน แสงสีขาว สีส้ม และสีม่วง ส่งผลให้มีจำนวนใบมากกว่าแสงสีชมพู แสดงใน Table 1 เช่นเดียวกับ วันทนา สมบูรณ์ทรัพย์ และคณะ (2558) ทำการศึกษาผลของไดโอดเปล่งแสง (LEDs) ต่อการเพิ่มจำนวนโปรโตคอร์มไลท์บอดี (PLBs) ของกล้วยไม้สกุลหวายไซเนียเยียสกุลในสภาพปลอดเชื้อพบว่า PLBs ที่เลี้ยงภายใต้แสงสีแดงจากหลอด LEDs มีจำนวน PLBs น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงที่สุด โดยมีจำนวน PLBs เพิ่มขึ้นมากกว่าแสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ถึงร้อยละ 28.6 ในขณะที่แสงสีต่างๆ จากหลอด LEDs มีผลต่อการเพิ่มจำนวนของ PLBs ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

Table 1 Effect of different color of light on plant growth of *Dendrobium friedericksianum* Rchb.f. after cultured for 6 months

Light condition	Plant height (cm)	Pseudobulb diameter (cm)	Number of leaves
white	23.47	0.61	11.75 ^a
orange	23.22	0.78	8.90 ^a
purple	20.43	0.67	8.10 ^a
pink	20.64	0.74	3.20 ^b

Means with different letter within column are significantly different at ($p \leq 0.05$).

ซึ่งสอดคล้องกับ Phanumas and Kamplon (2007) ที่ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตแสงเทียมด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดง (640 นาโนเมตร) และสีน้ำเงิน (470 นาโน

เมตร) เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของกล้วยไม้ช้างแดงไทย พบว่า กล้วยไม้ที่ทดลองปลูกภายใต้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงมีอัตราการเจริญเติบโตของขนาดใบ จำนวนใบ ความยาวราก และจำนวนราก ดีกว่ากล้วยไม้ที่ปลูกด้วยแสงสีน้ำเงิน และแสงธรรมชาติ

2. ผลการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ของสารสกัดกล้วยไม้

เมื่อนำกล้วยไม้จากการผ่านการเลี้ยงในแสงสีที่แตกต่างกัน เป็นระยะเวลา 7 เดือน มาสกัดสารออกฤทธิ์หาปริมาณผลผลิตและวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม ปริมาณฟลาโวนอยด์ และค่า IC_{50} ได้ผลการทดลองแสดงใน Table 2 พบว่าปริมาณผลผลิตของสารสกัดกล้วยไม้จากการเลี้ยงด้วยแสงสีที่ต่างกันไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดกล้วยไม้ที่ได้จากการเลี้ยงด้วยแสงสีม่วงมีปริมาณสูงสุดโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดที่ได้จากการเลี้ยงด้วยแสงสีชมพู แสงสีขาวและแสงสีส้ม ส่วนปริมาณฟลาโวนอยด์รวมของสารสกัดกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีต่างๆ ให้ผลไปในทางเดียวกับปริมาณฟีนอลิกรวม ซึ่งพบว่าสารสกัดที่ได้จากการเลี้ยงด้วยแสงสีม่วงมีปริมาณฟลาโวนอยด์รวมสูงกว่าแสงสีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณผลผลิตของสารสกัดกล้วยไม้ที่ได้สำหรับผลการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีต่าง ๆ ด้วยวิธี DPPH radical scavenging และวิธี ABTS radical scavenging โดยรายงานเป็นค่า IC_{50} จากผลการทดลองพบว่าค่า IC_{50} ของสารสกัดกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีม่วงมีค่าต่ำกว่าสารสกัดจากกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมที่พบปริมาณสูงที่สุดในสารสกัดที่เลี้ยงด้วยแสงสีม่วง แตกต่างกับรายงานวิจัยของ Yeow *et al* (2020) ที่รายงานว่าการใช้แสงสีขาวจากหลอด LEDs สามารถเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในโปรโตคอร์มไลท์บอดี (PLBs) ของกล้วยไม้สกุลหวายลูกผสมในสภาพปลอดเชื้อ เนื่องจากแสงสีขาวมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืช และไม่มีการปลดปล่อยความร้อนเหมือนหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงแนวโน้มที่ดีในการเลี้ยงกล้วยไม้ภายใต้แสง LED เพื่อลดเวลาในการปลูก และสามารถควบคุมปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ต้องการได้เมื่อเทียบกับการปลูกในธรรมชาติ

Table 2 Yield and properties of bioactive compounds of *Dendrobium fredericksianum* Rchb.f. stem extracts cultured different light conditions for 7 months

Phytochemical content	Light conditions			
	white	orange	purple	pink
Yield of crude extract (percentage)	8.31±0.25	8.06±0.79	7.89±0.37	8.44±0.17
Total phenolic content (mgGAE.g ⁻¹)	9.10±0.20 ^b	9.01±0.06 ^b	9.71±0.06 ^a	9.23±0.07 ^b
Flavonoid content (mgQE.g ⁻¹)	188.44±3.87 ^b	180.07±3.63 ^c	194.38±2.32 ^a	174.56±2.32 ^c
IC ₅₀ DPPH radical scavenging (mg/mL)	1456.39±27.35 ^b	1496.72±6.37 ^a	1128.58±25.84 ^d	1189.57±7.35 ^c
IC ₅₀ ABTS radical scavenging (mg/mL)	801.06±20.65 ^b	823.81±32.44 ^{ab}	639.41±14.96 ^c	868.13±28.94 ^a

Means with different letter within row are significantly different at ($p \leq 0.05$).

3. ผลของการเคลือบสารเคลือบผิว

ผลของการเคลือบสารเคลือบผิวในการชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยไข่และมะนาว และมีผลต่อการยืดอายุการเก็บรักษา โดยมีผลชะลอการเปลี่ยนแปลงของสี ค่าความสว่าง สีเขียวและสีเหลือง ในระยะเวลาเก็บรักษา 7 วัน ผลการทดลองพบว่าการใช้สารเคลือบผิวทุกระดับความเข้มข้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ แสดงใน Table 3 และ 4 กล้วยไข่ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารสกัดเข้มข้น 1% มีแนวโน้มช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างได้มากที่สุด และมีการเปลี่ยนแปลงสีเขียวน้อยที่สุด ด้วยค่าความสว่างและค่าสีเขียวเท่ากับ 58.83 และ 4.60 ตามลำดับ และมีค่าสีเหลืองเท่ากับ 40.57 โดยไม่มีความแตกต่างกับความเข้มข้นอื่นๆ สำหรับมะนาวการเคลือบด้วยสารสกัดเข้มข้น 1.5% สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงของสีได้มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของความสว่างเท่ากับ 50.63 ค่าสีเขียว -2.10 และค่าสีเหลือง 37.97 ในวันที่ 7 ของการเก็บรักษาโดยไม่มีความแตกต่างกัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ ความหวาน ความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรดของกล้วยไข่มีความสัมพันธ์กัน แสดงผลใน Table 5 พบว่าความแน่นเนื้อของผลที่ลดลง มีผลต่อความหวานและความเป็นกรดต่างที่ลดลงด้วย กล้วยไข่ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารสกัดเข้มข้น 1% ระยะการเก็บรักษา 7 วัน มีแนวโน้มชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นเนื้อ 4.16% และมีความหวาน 10.46% ความเป็นกรดต่าง 5.66 และปริมาณกรด 1.54% แต่ไม่มีความแตกต่างกันในทุกระดับความเข้มข้น

Table 3 Color value of coated bananas and stored at room temperature (30±2 °C) for 7 days

Orchid extract (%)	Color value		
	L*	a*	b*
Control	60.43±1.48	10.93±1.80	40.73±2.25
0	63.17±1.46	10.97±3.00	42.63±2.31
0.5	59.00±5.25	4.90±6.97	38.57±4.74
1.0	58.83±6.26	4.60±8.70	40.57±5.99
1.5	59.50±3.91	5.23±6.09	40.73±4.73

Table 4 Color value of coated lime and stored at room temperature (30±2 °C) for 7 days

Orchid extract (%)	Color value		
	L*	a*	b*
Control	56.13±2.44	0.87±1.86	44.17±21.47
0	55.17±5.81	-0.33±6.47	46.57±6.90
0.5	52.33±4.08	-2.13±2.50	39.90±8.73
1.0	50.67±5.59	-2.67±3.65	39.23±9.67
1.5	50.63±1.69	-2.10±0.96	37.97±3.89

ส่วนมะนาว พบว่า การเคลือบด้วยสารสกัดไม่มีผลต่อเปลี่ยนแปลงในความแน่นเนื้อ ความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรด ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งมีค่าความแน่นเนื้อมากกว่า 5 Kg/cm² ความเป็นกรดต่างและปริมาณกรด โดยไม่มีความแตกต่างกันในทุกระดับของความเข้มข้น

Table 5 Results of firmness, %brix, pH value and %total acidity of bananas stored at room temperature (30 ± 2 °C) for 7 days

Orchid extract (%)	Firmness (Kg/cm ²)	% Brix	pH value	% Total acidity
Control	3.90±0.23	11.67±9.43	5.45±0.42 ^b	1.27±0.96
0	4.10±0.58	11.75±9.00	5.64±0.37 ^{ab}	1.33±0.79
0.5	4.11±0.50	11.79±8.31	5.63±0.37 ^{ab}	1.45±0.98
1.0	4.16±0.53	10.46±7.84	5.66±0.39 ^{ab}	1.54±0.83
1.5	3.87±0.27	13.25±9.86	5.76±0.68 ^a	1.44±0.95

Means with different letter within column are significantly different at ($p\leq 0.05$).

จากผลการพัฒนาสารเคลือบด้วยสารสกัดจากลำลูกกล้วยกล้วยไม้ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษากลับไข่และมะนาวดังกล่าว พบว่าการใช้สารเคลือบผิวจากสารสกัดกล้วยไม้ความเข้มข้น 1.0-1.5% มีแนวโน้มช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยไข่และมะนาวได้ โดยชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างค่าสีเขียวและค่าสีเหลือง ในระหว่างการเก็บรักษา 1-7 วัน สีของผลไม้ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากในผลไม้มีรงควัตถุแคโรทีนอย์รวมกับคลอโรฟิลล์ในคลอโรพลาสต์ เมื่อผลไม้สุกคลอโรฟิลล์จะสลายตัวแต่แคโรทีนและแซนโทฟิลล์จะยังคงอยู่และปรากฏสีเด่นชัด ทำให้มีสีเหลืองเข้มจนเกือบสีน้ำตาล (दनัยบุญเกียรติ, 2547) ส่วนการชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ ความหวาน ความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรดของกล้วยไข่มีความสัมพันธ์กับค่าความหวาน และความเป็นกรดต่างที่ลดลงเนื่องจากกล้วยเป็นไม้ผลประเภทไคลแมเทอริก (climacteric fruit) เมื่อมีการสุกจะเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล มีการหายใจและการสร้างเอทิลีนเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ที่ทำให้เนื้ออ่อนนุ่มลงจากการทำงานของเอนไซม์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลจากสีเขียวเป็นสีเหลือง ซึ่งสีนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกความแก่สุก (อนุชา จันทบูรณ์, 2548) สำหรับมะนาวเป็นผลไม้ประเภทนอน-ไคลแมเทอริก (non-climacteric fruit) มีอัตราการหายใจค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอหรืออัตราการหายใจจะลดลงอย่างช้าๆ พร้อมกับที่ผลไม้ค่อยๆ สุก และอมเน่าเสียไป ผลการใช้สารเคลือบที่มีต่อการชะลอการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าว นั้น สารเคลือบผิวเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเสมือนเยื่อเลือกผ่านในการปรับเปลี่ยนบรรยากาศ โดยลดอัตราการหายใจ การแลกเปลี่ยนก๊าซ และอัตราการเกิดออกซิเดชัน รวมถึงการชะลอการเสื่อมสภาพและการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Rojas-Grau *et al.*, 2009; Trevino-Garza *et al.*, 2015)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การปลูกเลี้ยงกล้วยไม้หวายจันทร์บูรภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน คือ แสงสีขาว, แสงสีส้ม, แสงสีม่วง และแสงสีชมพู เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตทางด้านความสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำลูกกล้วยไม้แตกต่างกันทางสถิติ มีความสูงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20.43 ถึง 23.470 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.61 ถึง 0.78 เซนติเมตร และเมื่อนำกล้วยไม้ที่ผ่านการเลี้ยงภายใต้แสงสีมาสกัดหาปริมาณผลผลิตสารสกัดหยาบ และวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม ปริมาณฟลาโวนอยด์ และค่า IC₅₀ พบว่าการเลี้ยงกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูรภายใต้แสงสีม่วงให้ผลดีกว่าแสงสีอื่นๆ โดยปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมในสารสกัดจากกล้วยไม้ที่เลี้ยงด้วยแสงสีม่วงมีปริมาณสูงสุด และผลการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดดีกว่าสารสกัดที่เลี้ยงด้วยแสงสีอื่นๆ เช่นกัน ส่วนการพัฒนาสารเคลือบจากสารสกัดกล้วยไม้พบว่า จากผลการพัฒนาสารเคลือบด้วยสารสกัดจากกล้วยไม้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษากลับไข่และมะนาวดังกล่าว พบว่า การเก็บรักษากลับไข่และมะนาว 1-7 วัน โดยการใช้สารเคลือบผิวจากสารสกัดกล้วยไม้ทุกระดับความเข้มข้นให้ผลไม้แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งการใช้สารเคลือบมีแนวโน้มในการยืดอายุการเก็บรักษา ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยไข่และมะนาว และมีแนวโน้มในการชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ ความหวาน ความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรดของกล้วยไข่ จากผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรสารเคลือบกล้วยไข่และมะนาวในขั้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2565 ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี สำหรับสถานที่ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- จิตรพรพรรณ พิสิฐ. (2550). การเพาะเมล็ดและเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- दनัย บุญเกียรติ. (2547). การสุกของผลไม้ ในสื่อประกอบการเรียนการสอนรายวิชา *Postharvest physiology horticultural course*. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นินา จุลโพธิ์. (2559). การทดสอบสารพฤกษเคมี และฤทธิ์ทางชีวภาพของดอกกล้วยไม้สกุลหวาย [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา]. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิรยา รัตนพานนท์. (2562). ฟิล์มที่บริโภคได้. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0666/edible-film>.
- วันทนา สมบูรณ์ทรัพย์, พัชรียา บุญก่อแก้ว และพูนพิภพ เกษมทรัพย์. (2558). ผลของไดออกไซด์เปล่งแสงต่อการเพิ่มจำนวนโปรโตคอร์มไลบอดี้ของกล้วยไม้หวายไซเนียเอียสกุล. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35* (น. 675-680). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วาสนา ประภาเลิศ, วิมลรัตน์ พงษ์ไตรทิพย์ และกิตติศักดิ์ โชติกเดชาณรงค์. (2561). การศึกษาฤทธิ์ของสารพฤกษเคมีในกล้วยไม้ป่าและแนวทางการขยายพันธุ์สำหรับชุมชน. <http://cmruir.cmru.ac.th/handle/123456789/1266?locale=th>
- อบฉันท์ ไทยทอง. (2549). กล้วยไม้เมืองไทย (ครั้งที่ 12). บ้านและสวน.
- อนุชา จันทบูรณ์. (2548). เอกสารประกอบการเรียนการสอนรายวิชาหลักการไม้ผล. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตน่าน.
- Chidambara M. K.N., Jayaprakasha G.K. & Singh R.P. (2002). Studies on antioxidant activity of pomegranate (*Punica granatum*) peel extract using in vivo models. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 4791-4795.
- Hasan, M.M., T. Bashir, R. Ghosh, S.K. Lee, & Bae, H. (2017). An overview of LED_s effects on the production of bioactive compounds and crop quality. *Molecules*, 22(9), 1420.
- Hossain, M.M. (2011). Therapeutic orchids: traditional uses and recent advances-An overview. *Fitoterapia*, 82, 102-140.
- Phanumas, K. & Kamplon, P. (2007). Lighting system for growth enhancement of Thai orchids. *Proceeding of the 2007 ECTI International Conference*.
- Prommajak, T., Surawang, S & Rattanapanone, N. (2014). Ultrasonic-assisted extraction of phenolic and antioxidative compounds from lizard tail (*Houttuynia cordata* Thunb. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 36(1), 65-72.
- Rojas-Graü, M. A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 20(10), 438-447.
- Singhatong, S., Leelarungrayub, D., & Chaiyasut, C. (2010). Antioxidant and toxicity activities of *Artocarpus lakoocha* Roxb. heartwood extract. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(10), 947-953.
- Trevino-Garza, M. Z., Garcia, S., Flores-González, M.S., & Arévalo-Niño, K. (2015). Edible Active Coatings Based on Pectin, Pullulan, and Chitosan Increase Quality and Shelf Life of Strawberries (*Fragaria ananassa*). *Journal of Food Science*, 80(8), 1823-1830.
- Yeow, L.C., Chew, B.L., & Sreeramanan, S. (2020). Elevation of secondary metabolites production through light-emitting diodes (LEDs) illumination in protocorm-like bodies (PLBs) of *Dendrobium* hybrid orchid rich in phytochemicals with therapeutic effects. *Biotechnology Reports*, 27, 1-5.

ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากพืชสูตรผสม และการประยุกต์ใช้ในสบู่เหลว

Antibacterial activities of formulated plant ethanolic extracts and application in liquid soap products

มณฑล วิสุทธิ^{1*}, จุฑามาศ หนูชื่น¹, ฉัตรสุดา ถนอมศิลป์¹, ชนัตรา พลวงนอก² และ วิมลรัตน์ ขวกเขียว²

Monton Visutthi^{1*}, Chuthamat Nuchuen¹, Chatsuda Thanomsin¹, Chanattra Pluangnok² and Wimonrat Khuakhiao²

Received: 3 September 2023; **Revised:** 16 October 2023; **Accepted:** 2 November 2023

บทคัดย่อ

สารสกัดจากพืชส่วนใหญ่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาสูตรผสมของสารสกัดจากพืช เพื่อให้ได้สูตรผสมของสารสกัดจากพืชที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้ การศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกพืชทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ ใบจากต้นสัก (*Tectona grandis* L.f.) เหง้าจากต้นไพล (*Zingiber cassumunar* Roxb.) เหง้าจากต้นขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) และผลจากต้นมะม่วงหาวมะนาวโห่ (*Carissa carandas* Linn.) มาทำการเตรียมสารสกัดด้วย 95% เอทานอล จากนั้นได้นำมาเตรียมสูตรผสมทั้งหมด 15 สูตร และทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ATCC 29213 และ *Escherichia coli* ATCC 25922 ด้วยวิธี Agar disc diffusion และ Broth microdilution สูตรผสมที่ให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อที่นี้จะถูกนำไปประเมินฤทธิ์ยับยั้งเชื้อกับแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ จำนวน 8 สายพันธุ์ และนำไปประยุกต์ใช้ในสบู่เหลวเพื่อเป็นสารออกฤทธิ์ควบคุมเชื้อแบคทีเรีย ทำการทดลองประสิทธิภาพการลดจำนวนเซลล์แบคทีเรียของสบู่เหลวผสมสารสกัดสูตรผสม ผลการทดลองพบว่า สารสกัดสูตรผสมที่ 4 มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียได้ดีกว่าสูตรผสมอื่น ๆ โดยมีค่า MIC ต่อแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ เท่ากับ 0.6-2.5 mg/ml และ 5.0-10.0 mg/ml ตามลำดับ และมีค่า MBC ต่อแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ เท่ากับ 2.5-10.0 mg/ml และ 10.0-20.0 mg/ml ตามลำดับ ผลการทดลองประสิทธิภาพของสบู่เหลวที่ผสมสารสกัดสูตรผสม พบว่าสบู่เหลวสามารถลดจำนวนเซลล์แบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวก และแกรมลบ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สารสกัดสูตรผสมระหว่างสัก ไพล ขมิ้น และมะม่วงหาวมะนาวโห่ มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบได้ดี

คำสำคัญ: สารสกัดสูตรผสมจากพืช, ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย, สบู่เหลว

Abstract

Many plant extracts are more effective against Gram-positive bacteria than Gram-negative bacteria. This research aimed to develop a plant extract formula with antibacterial activity against both Gram-positive and Gram-negative bacteria. Four distinct plant species, namely leaves of *Tectona grandis* L.f., rhizomes of *Zingiber purpureum* Roscoe, rhizomes of *Curcuma longa* L., and fruits of *Carissa carandas* L., were extracted using 95% ethanol. A total of 15 different extract formulations were prepared and subsequently evaluated for their antibacterial efficacy against *Staphylococcus aureus* ATCC 29213 and *Escherichia coli* ATCC 25922 using agar disc diffusion and broth microdilution methods. The most promising formulation was further assessed against eight strains of both Gram-positive and

¹ หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

¹ Bachelor of Education Program in Biology, Faculty of Education, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

² Bachelor of Science Program in Biology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

* Corresponding author : E-mail : monton.v@nrru.ac.th

Gram-negative bacteria. Additionally, the selected formulation was incorporated into a liquid soap, and its efficacy in reducing bacterial cell counts was investigated. The results demonstrated that the fourth formulation exhibited superior antibacterial activity with minimum inhibitory concentration (MIC) values ranging from 0.6 to 2.5 mg/ml against Gram-positive bacteria and 5.0 to 10.0 mg/ml against Gram-negative bacteria. Minimum bactericidal concentration (MBC) values of the formula against Gram-positive bacteria ranged from 2.5 to 10.0 mg/ml, while for Gram-negative bacteria, MBC values ranged from 10.0 to 20.0 mg/ml. This study also revealed that the liquid soap containing the extract formulation effectively reduced bacterial cell counts for both Gram-positive and Gram-negative bacteria. In conclusion, this study highlights the efficacy of the extract formula in combating a wide spectrum of bacterial infections.

Keywords: Formulation plant extract, anti-bacterial activity, liquid soap

บทนำ

การติดเชื้อที่ผิวหนัง และการติดเชื้อเรื้อรังในบาดแผล เช่น การเป็นสิ่ว แผลในผู้ป่วยเบาหวาน แผลไฟไหม้ หรือแผลจากอุบัติเหตุ ส่วนใหญ่มีสาเหตุการติดเชื้อจากแบคทีเรีย โดยจะพบการติดเชื้อของแบคทีเรียทั้งแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ เช่น *Propionibacterium* (*Cutibacterium*) *acnes* *Staphylococcus* sp. *Anaerococcus* sp. *Corynebacterium* sp. *Porphyromonas* sp. และ *Streptococcus* sp. (Misic et al., 2014; Kazimoto et al., 2018) การรักษาสิ่ว หรือแผลติดเชื้อเรื้อรังส่วนใหญ่จะใช้ยาปฏิชีวนะในการรักษา ซึ่งการรักษาเป็นเวลานาน อาจจะทำให้เกิดการดื้อยาของแบคทีเรียได้ ส่งผลให้การรักษาด้วยยาปฏิชีวนะไม่ได้ผล เพื่อลดปัญหาการดื้อยา และป้องกันไม่ให้เกิดการดื้อยาของเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น การศึกษาวิจัยเพื่อใช้สารเคมีจากพืชจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง สำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อควบคุมโรคติดเชื้อที่ผิวหนัง

การใช้สารเคมีที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น สัตว์ พืช แร่ธาตุ จึงเป็นทางเลือกที่ถูกนำมาใช้ทดแทนการใช้ยาปฏิชีวนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพืช ซึ่งเป็นแหล่งทางเลือกที่มีการศึกษาวิจัยสำหรับค้นหาสารเคมีที่ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีเพียงชนิดเดียวอาจก่อให้เกิดการดื้อต่อสารเคมี แบบเดียวกับที่พบในยาปฏิชีวนะได้เช่นกัน (Lachapelle et al., 2013; Cieplik et al., 2019) ดังนั้นการศึกษาในรูปแบบสารสกัดหยาบจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง หลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่า การใช้สารสกัดจากพืชเพียงชนิดเดียว สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ (Visutthi, 2016) รวมไปถึงการใช้สารสกัดสูตรผสมด้วยเช่นกัน (Temrangsee et al., 2011; มณฑล วิสุทธิ, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับคำรับยาแผนโบราณ จากการวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่า การใช้สารสกัดสูตรผสมในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจำเป็นต้องมีการวิจัย เพื่อแสดงให้เห็นว่าสูตรผสมของสารสกัดมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ดี ใน

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกสารสกัดที่ให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ดีจากพืช 4 ชนิด ได้แก่ สัก (*Tectona grandis*) ไพล (*Zingiber purpureum*) ขมิ้น (*Curcuma longa*) และมะม่วงหาวมะนาวโห่ (*Carissa carandas*) ซึ่งสารสกัดเหล่านี้ ได้มีการตรวจสอบเบื้องต้นแล้วว่าให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ในงานวิจัยนี้จึงได้นำสารสกัดจากพืชทั้ง 4 ชนิด มาเตรียมสูตรผสม และตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย จากนั้นนำสูตรผสมที่ให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อไปประเมินฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคชนิดอื่น ๆ

การทดลอง

1. แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง และการเลี้ยงเชื้อ

แบคทีเรียแกรมบวก 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *Staphylococcus aureus* ATCC 29213, Methicillin Resistant *S. aureus* NPRC 001R, *S. epidermidis* ATCC12228, *S. epidermidis* ATCC 35984 และ *S. intermedius* TISTR 668 และแบคทีเรียแกรมลบ 7 สายพันธุ์ ได้แก่ *Acinetobacter baumannii* NRRU 001, *Escherichia coli* ATCC 25922, *E. coli* NRRU 001R, *Chromobacterium violaceum* DMST 21761, *Klebsiella* sp. NRRU 004, *Salmonella enterica* NRRU 002 และ *S. Typhi* NRRU 003 ถูกนำมาแยกให้เป็นโคโลนี โดยเลี้ยงในอาหาร Trypticase Soy Agar (TSA, Hi-media) จากนั้นเชื้อโคโลนีของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์มาเพาะเลี้ยงในอาหาร Trypticase Soy Broth (TSB, Hi-media) แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการถ่ายเชื้อจากอาหาร TSB ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller Hinton Broth (MHB, Hi-media) จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 4-5 ชั่วโมง และนำมาปรับความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อด้วย 0.85% NaCl ให้เท่ากับความขุ่นของสารละลาย McFarland Standard No. 0.5 จะได้ปริมาณเชื้อประมาณ 1.5×10^8 CFU/ml และนำไปทดสอบในวิธีอื่นต่อไป

2. การเตรียมสกัดสารจากพืช

ส่วนต่าง ๆ ของพืชแต่ละชนิด ได้จากต้นไม้ที่พบในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ทั้งหมด 4 ชนิด ซึ่ง ได้แก่ ใบสัก เหง้าไพล เหง้าขมิ้น และผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ นำมาทำความสะอาด แล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ประมาณ 3-4 วัน บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด และนำไปแช่ใน 95% เอทานอล นาน 7 วัน จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง เพื่อแยกกากออกจากสารละลาย นำสารละลายที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่อง Rotary evaporator นำสารสกัดที่ได้ใส่ขวดแก้ว สารสกัดส่วนหนึ่งจะถูกนำมาละลายด้วยสารละลาย Dimethyl Sulfoxide (DMSO, Hi-media) ให้ได้ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 500 mg/ml เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

Table 1 Extract formulation and the formula ratio of each plant extract.

Formulation	Plant extracts			
	Leaves of <i>Tectona grandis</i>	Rhizomes of <i>Zingiber purpureum</i>	Rhizomes of <i>Curcuma longa</i>	Fruits of <i>Carissa carandas</i>
Formula 1	2	1	1	1
Formula 2	1	2	1	1
Formula 3	1	1	2	1
Formula 4	1	1	1	2
Formula 5	1	1	1	1
Formula 6	1	1	1	-
Formula 7	1	1	-	1
Formula 8	1	-	1	1
Formula 9	-	1	1	1
Formula 10	1	1	-	-
Formula 11	1	-	1	-
Formula 12	1	-	-	1
Formula 13	-	1	1	-
Formula 14	-	1	-	1
Formula 15	-	-	1	1
<i>Tectona grandis</i>	1	-	-	-
<i>Zingiber purpureum</i>	-	1	-	-
<i>Curcuma longa</i>	-	-	1	-
<i>Carissa carandas</i>	-	-	-	1

3. การเตรียมสูตรสารสกัดพืช

สารสกัดที่เตรียมได้ข้างต้น จะถูกนำมาเตรียมเป็นสูตรผสมด้วยอัตราส่วนตามที่ระบุใน Table 1 (ดัดแปลงจาก Temrangsee *et al.*, 2011; มณฑล วิสุทธิ, 2019) จะได้สูตรผสมที่แตกต่างกันทั้งหมด 15 สูตร จากนั้นนำสูตรผสมที่ได้ไปตรวจฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียตามวิธี agar disc diffusion และ Broth microdilution

4. การตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียด้วยวิธี Agar disc diffusion

สูตรผสม และสารสกัดแต่ละชนิด จะถูกหยดในปริมาตร 10 µl (5 mg/disc) ลงบนแผ่นกระดาษกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และตรวจสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียด้วยวิธี Agar disc diffusion (มณฑล วิสุทธิ, 2017; 2019) เชื้อแบคทีเรียที่เตรียมได้ข้างต้น จะถูกนำมาใช้ทดสอบด้วยการใช้ cotton swab จุ่มเชื้อที่ปรับความเข้มข้นแล้ว เกลี่ยให้ทั่วผิวหน้าอาหาร Mueller-Hinton Agar (MHA) จากนั้นวางแผ่นสารสกัด ในการทดลองนี้ได้ใช้ชุดควบคุม negative control ใช้เป็น DMSO และ positive control ใช้เป็นยาปฏิชีวนะ Enrofloxacin (10 µg/disc; Hi-media) นำจานอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 24 ชั่วโมง ตรวจสอบการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงใสที่เกิดขึ้นรอบแผ่นสารสกัดด้วย venire caliper 3 ครั้ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของวงการยับยั้ง

5. การตรวจสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียด้วยวิธี Broth microdilution

สูตรผสมและสารสกัดจะถูกนำมาศึกษาปริมาณการยับยั้งแบคทีเรียด้วยการหาค่า Minimum inhibitory concentration (MIC) และค่า Minimum bactericidal concentration (MBC) (มณฑล วิสุทธิ, 2017; 2019) โดยมีวิธีดังนี้ นำเชื้อแบคทีเรียที่ปรับความเข้มข้นแล้วข้างต้น มาเจือจางต่อด้วยอาหารเหลว MHB ให้มีปริมาณเชื้อประมาณ 1.0×10^6 CFU/ml นำสูตรผสมและสารสกัดที่ต้องการทดสอบมาเจือจางด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ MHB ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 80 mg/ml ทำการเจือจางสูตรผสมและสารสกัดใน 96-well plate แบบลำดับส่วนปริมาตร 100 µl จากนั้นเติมเชื้อที่เตรียมไว้ข้างต้น ใส่ลงในแต่ละหลุมของ 96-well plate หลุมละ 100 µl จะได้ความเข้มข้นสุทธิของสูตรผสมและสารสกัดเป็น 20-0.31 mg/ml โดยให้มีหลุมควบคุมเป็นเชื้อกับอาหารเลี้ยงเชื้อ และอาหารเลี้ยงเชื้อกับสูตรผสมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

(Negative control) บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 18-24 ชั่วโมง ตรวจสอบผลการทดลองด้วยเครื่อง Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 600 nm และบันทึกผลการทดลองเป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดที่ไม่มีการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย โดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงกับหลุม กลุ่มควบคุมเชิงลบ (Negative control) ซึ่งจะมีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ Negative control

จากนั้นนำอาหารของแต่ละหลุมที่ไม่มีการเจริญของเชื้อแบคทีเรียจากการหาค่า MIC ปริมาตร 10 µl เพาะเลี้ยงบนอาหาร MHA บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 18-24 ชั่วโมง อ่านผล และบันทึกความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดที่ไม่มีการเจริญของเชื้อแบคทีเรียบนผิวหน้าอาหาร จะได้เป็นค่า MBC

6. การเตรียมสบู่เหลวสำหรับล้างหน้า

นำส่วนผสมสบู่ (Table 2) ได้แก่ หัวสบู่ (Texapon N8000) น้ำหนัก 330 กรัม ผสมกับ Ammonium Lauryl Sulfate ปริมาณ 30 กรัม และเกลือ NaCl ปริมาณ 30 กรัม ใส่ภาชนะพร้อมผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร ตามด้วย Prioly B-750D และ Glycerin อย่างละ 30 กรัม ผสมให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน กวนจนให้อุณหภูมิเย็นลงลง จากนั้นนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

Table 2 Ingredients of liquid soap.

Ingredients	Amount
Texapon N8000	330 g
Ammonium Lauryl Sulfate	30 g
Sodium Chloride	30 g
Distilled water	550 ml
Prioly B-750D	30 g
Glycerin	30 g

7. การตรวจสอบประสิทธิภาพของสบู่เหลวผสมสารสกัดสูตรผสม ต่อการลดปริมาณแบคทีเรีย

7.1 การเตรียมแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง การทดลองในส่วนนี้ ใช้เชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228 และ *E. coli* ATCC 25922 นำเชื้อแบคทีเรียที่ต้องการทดสอบเพาะเลี้ยงบน TSA บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 24 ชั่วโมง ให้ได้โคโลนีเดี่ยว เลือกเชื้อ 3-5 โคโลนี เพาะเลี้ยงใน MHB บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 3-5 ชั่วโมง ปรับความขุ่นให้ได้เท่ากับสารละลายเบรียมซัลเฟต McFarland no. 0.5 ด้วย 0.85% NaCl มีเชื้อประมาณ 1.5×10^6 CFU/ml

7.2 การเตรียมสบู่ผสมสารสกัดสูตรผสม

นำเนื้อสบู่ที่ได้ผสมกับสารสกัดด้วยความเข้มข้นที่ระดับ MBC 2MBC 4MBC และ 8MBC

7.3 การทดสอบประสิทธิภาพการลดแบคทีเรียบนผิวหนังของสบู่เหลวผสมสารสกัดสูตรผสม

ในการทดลองนี้ได้ใช้หนังหมูสด นำมาล้างทำความสะอาด และตัดให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 4x5 ซม. (ซึ่งสามารถวางในจานอาหารเลี้ยงเชื้อได้) จากนั้นแช่หนังหมูใน 70% แอลกอฮอล์นาน 20 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียที่ปนเปื้อนออก และผึ่งให้แห้ง ทาเชื้อที่เตรียมไว้ ข้อ 7.1) ให้ทั่วผิวหนังหมูผึ่งให้แห้ง และนำไปทดลอง โดยแบ่งหนังหมูออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 สำหรับควบคุมจำนวนเชื้อที่ตกลงบนหนัง กลุ่มที่ 2 นำไปล้างน้ำเปล่า กลุ่มที่ 3 ล้างด้วยสบู่ที่ไม่ได้ผสมสารสกัด และกลุ่มที่ 4 ล้างด้วยสบู่ที่ผสมสารสกัด โดยได้เตรียมไว้ 4 ความเข้มข้น ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

กลุ่มที่ 1 เมื่อลงเชื้อเสร็จแล้วนำไปหาจำนวนเชื้อตามวิธีด้านล่าง กลุ่มที่ 2 นำหนังหมูไปล้างน้ำนาน 30 วินาที กลุ่มที่ 3 และ 4 หยดสบู่ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ลงบนหนังหมูสบู่ให้ทั่ว ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที และล้างออกด้วยน้ำนาน 30 วินาที จากนั้นนำไปหาปริมาณเชื้อ

หนังหมูแต่ละกลุ่มการทดลอง มีหนังหมู 2 แผ่น แผ่นที่ 1 เมื่อผ่านการทดลองแล้ว นำไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อแบบ Selective media (Mannitol salt agar สำหรับ *S. epidermidis* และ Eosin methylene blue สำหรับ *E. coli*) อีกหนึ่งแผ่นนำไปหาปริมาณเชื้อบนผิวหนัง โดยการใส่ในถุงที่มีน้ำเกลือ 9 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจาง 10 เท่า และดูดเชื้อที่เจือจางแล้วมา 1 มิลลิลิตร เกลี่ยบนอาหารเลี้ยงเชื้อแบบ Selective media นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 16-18 ชั่วโมง ตรวจสอบและนับจำนวนโคโลนี คำนวณปริมาณเชื้อ

8. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล ด้วยวิธี One way ANOVA วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) เวอร์ชัน 22 และกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ 95% ตามลำดับ

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1.ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากพืช และสูตรผสม

ผลการตรวจสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากพืชและสูตรผสมด้วยวิธี Agar disc diffusion แสดงให้เห็นว่า สารสกัดจากพืชและสูตรผสมที่เตรียมขึ้น มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกเพียงอย่างเดียว โดยสารสกัดจากใบสักให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ (มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการยับยั้งมากกว่า 10 มม.) ดีกว่าสารสกัดจากเหง้าขมิ้น เหง้าไพล และผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ (Table 3)

สารสกัดจากพืช และสารสกัดสูตรผสมทั้งหมดถูกนำไปตรวจหาค่า MIC และค่า MBC ด้วยวิธี Broth microdilution ผลการทดลองพบว่า สารสกัดสูตรผสมที่ 4 ให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวก และแกรมลบ และเชื้อดื้อยา โดยมีค่า MIC/MBC ต่อเชื้อ *S. aureus* และเชื้อดื้อยา MRSA เท่ากับ 0.6/10 mg/ml และ 1.25/20 mg/ml ตามลำดับ และค่า MIC/MBC ต่อเชื้อ *E. coli* และเชื้อดื้อยา *E. coli* R เท่ากับ 10/20 mg/ml และ 10/20 mg/ml ตามลำดับ สารสกัดสูตรผสมให้ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าการใช้สารสกัดเพียงชนิดเดียว (Table 4)

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างสารสกัดสูตรผสมที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมลบ การเตรียมสูตรผสมนี้ เตรียมจากสารสกัดที่สกัดด้วย 95% เอทานอล และมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมบวก จากงานวิจัยในห้องปฏิบัติการของผู้วิจัย พบว่าสารสกัดจากใบสักให้สีแดงเข้ม และมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมบวกได้ดี สารสกัดจากไพลให้สีเหลืองเข้ม สารสกัดจากขมิ้นให้สีเหลือง สารสกัดทั้งสองชนิดมีการละลายน้ำดำ สารสกัดจากผลมะม่วงหาวมะนาวโห่มีสีแดง และมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบได้ (มณฑล วิสุทธิ, 2019) เมื่อนำมาเตรียมเป็นสูตรผสม และทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการทดสอบด้วยวิธี Agar disc diffusion สารสกัดไม่แสดงผลการยับยั้งกับแบคทีเรียแกรมลบ (Table 3) ซึ่งพบได้ในผลการทดลองก่อนหน้านี้ (มณฑล วิสุทธิ, 2017, 2019; Visutthi, 2016) สารสกัดที่มีการละลายน้ำไม่ดี จะให้ผลการทดลองเป็นลบ เมื่อทดสอบด้วยวิธี Agar disc diffusion

การนำสารสกัดแต่ละชนิดมาผสมกันมีความจำเป็นต้องศึกษาการเสริมฤทธิ์ และการต้านฤทธิ์กันของสารสกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการให้สารสกัดมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย ผลการทดลองในตารางที่ 3 และ 4 ได้แสดงให้เห็นว่า การผสมกันของสารสกัดให้ผลการยับยั้งเชื้อแตกต่างกัน เมื่อเทียบกับฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดเพียงชนิดเดียว เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ (มณฑล วิสุทธิ, 2019) สาร

สกัดใบพลู ผสมกับเหง้าขมิ้น ให้ผลยับยั้งและฆ่าเชื้อ ดีกว่าการทดสอบด้วยสารสกัดจากใบพลู หรือเหง้าขมิ้นเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

2. ผลการประเมินฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียของสูตรผสมที่ 4 ด้วยวิธี Broth microdilution

ฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดีของสารสกัดสูตรผสมที่ 4 สูตรผสมนี้จึงถูกนำไปตรวจสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียต่อเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ได้แก่ *Klebsiella* sp., *Salmonella* Typhi, *Salmonella enterica*, *Acinetobacter baumannii*, *Chromobacterium violaceum*, *Staphylococcus intermedius*, *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228 และ *Staphylococcus epidermidis* ATCC 35984 ผลการทดลองพบว่า สารสกัดสูตรที่ 4 ให้ค่า MIC อยู่ระหว่าง 1.25-10 mg/ml และมีค่า MBC อยู่ระหว่าง 5-20 mg/ml (Table 5) ค่าอัตราส่วนระหว่าง MBC/MIC อยู่ระหว่าง 1-16 เท่า โดยค่าอัตราส่วนระหว่าง MBC/MIC ต่อแบคทีเรียแกรมบวก อยู่ระหว่าง 2-16 เท่า ค่าอัตราส่วนระหว่าง MBC/MIC ต่อแบคทีเรียแกรมลบ อยู่ระหว่าง 1-8 เท่า

พืชที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ มีการรายงานฤทธิ์ต้านแบคทีเรียมากมาย เช่น ใบสัก จากงานวิจัยของ Prajuabjinda et al. (2012) รายงานว่าสารสกัดจากใบสักที่สกัดด้วยเอทานอล 95% มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ในระดับดี (มีค่า MIC เท่ากับ 0.15 mg/ml) ไพลที่สกัดด้วยเฮกเซนให้ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้ดี โดยมีฤทธิ์ยับยั้ง *S. aureus* (ค่า MIC และ MBC เท่ากับ 1.09 และ 2.19 mg/ml) และ *E. coli* (ค่า MIC และ MBC เท่ากับ 2.19 และ 4.37 mg/ml) (Taechowisan et al., 2018) สารสกัดจากเหง้าขมิ้นชันที่สกัดด้วยน้ำ ให้ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียโดยมีค่า MIC อยู่ระหว่าง 4-16 mg/ml และมีค่า MBC อยู่ระหว่าง 16-32 mg/ml (Niamsa & Sittiwet, 2009) ผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่สกัดด้วยแอลกอฮอล์ให้ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เมื่อทดสอบด้วยวิธี agar disc diffusion (Jampa et al., 2019; มณฑล วิสุทธิ, 2019) ในรายงานวิจัยนี้ ได้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดแต่ละชนิดมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก แต่ไม่มีฤทธิ์หรือมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบในระดับต่ำ (Table 4) และเมื่อเตรียมเป็นสูตรผสม และทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Broth microdilution พบว่าสูตรผสมที่ 4 สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีทั้งแกรมบวก และแกรมลบรวมถึงแบคทีเรียดื้อยา สูตรที่ 4 มีส่วนผสมของสารสกัดทั้ง 4 ในอัตราส่วน 1:1:1:2 (ใบสัก:เหง้าไพล:เหง้าขมิ้นชัน:ผลมะม่วงหาวมะนาวโห่) แสดงการเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างค่า

MBC/MIC ยังแสดงให้เห็นว่าสูตรผสมที่ 4 มีประสิทธิภาพที่ดีต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 8 เท่า (Gonzalez et al., 2013) อย่างไรก็ตามผลการทดสอบกับแบคทีเรียบางชนิดให้อัตราส่วนที่มากกว่า 8 เท่า (Table 5) ดังนั้นการเลือก

ใช้สูตรผสมนี้ เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียบางชนิดอาจจะต้องระมัดระวัง อัตราส่วน MBC/MIC เป็นการประเมินฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียเบื้องต้นของสารที่สามารถใช้ควบคุมเชื้อแบคทีเรีย การนำไปประยุกต์ใช้จริงอาจจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

Table 3 Antibacterial activities of different formula extracts using agar disc diffusion.

Formulations and extracts	Inhibition zone (mm±SD)			
	<i>S. aureus</i>	MRSA	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i> R
Formula 1	7.50±0.21	8.80±0.15	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 2	7.50±0.07	9.80±0.17	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 3	7.50±0.07	10.70±0.15	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 4	8.50±0.07	9.30±0.10	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 5	8.00±0.00	9.50±0.07	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 6	7.00±0.00	10.30±0.21	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 7	7.00±0.14	9.30±0.15	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 8	9.00±0.00	8.50±0.07	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 9	7.00±0.00	9.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 10	8.00±0.00	8.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 11	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 12	10.00±0.00	10.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 13	8.00±0.00	9.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 14	8.00±0.00	7.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Formula 15	10.00±0.00	10.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Tectona grandis</i>	10.70±0.12	15.80±0.30	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Zingiber purpureum</i>	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Curcuma longa</i>	0.00±0.00	8.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
<i>Carissa carandas</i>	0.00±0.00	9.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
Antibiotic	28.00±0.17	21.70±0.06	23.70±0.32	10.30±0.06

Table 4 MIC and MBC values of different formula extracts.

Formulations and extracts	MIC and MBC values (mg/ml)			
	<i>S. aureus</i>	MRSA	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i> R.
Formula 1	20/2.5	2.5/>20	20/20	>20/>20
Formula 2	20/0.6	20/0.6	20</20	>20/>20
Formula 3	10/0.6	20/0.6	20/20	20/>20
Formula 4	10/0.6	20/1.25	20/10	20/10
Formula 5	20/0.6	20/0.6	20/20	>20/>20
Formula 6	10/2.5	20</5	>20/>20	>20/>20
Formula 7	20/5	5/>20	20/20	>20/>20

Table 4 MIC and MBC values of different formula extracts

Formulations and extracts	MIC and MBC values (mg/ml)			
	<i>S. aureus</i>	MRSA	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i> R.
Formula 8	20/10	20/2.5	20/20	20/20
Formula 9	10/10	5/20	20</10	20/>20
Formula 10	20</10	10/>20	>20/>20	>20/>20
Formula 11	20</5	2.5/>20	>20/>20	>20/>20
Formula 12	20</5	20</5	20/10	20/10
Formula 13	20/5	5/2.5	>20/>20	>20/>20
Formula 14	10/5	20/5	20</10	10/>20
Formula 15	20/5	10/2.5	10/>20	5/>20
<i>Tectona grandis</i>	5/5	1/2.50	20/>20	5/>20
<i>Zingiber purpureum</i>	2</100	10/>20	>20/>20	>20/>20
<i>Curcuma longa</i>	0.6/5	2</50	>20/>20	>20/>20
<i>Carissa carandas</i>	20/5	20/5	20/5	5/>20

Table 5 Antibacterial activities of formula 4 against other bacterial strains

Bacterial strains	MIC values (mg/ml)	MBC values (mg/ml)	MBC/MIC ratio
<i>Acinetobacter baumannii</i> NRRU 001	10	10	1
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	10	20	2
<i>Escherichia coli</i> NRRU 001R	10	20	2
<i>Chromobacterium violaceum</i> DMST 21761	5	10	2
<i>Klebsiella</i> sp. NRRU 004	10	20	2
<i>Salmonella enterica</i> NRRU 002	10	20	2
<i>Salmonella</i> Typhi NRRU 003	2.5	20	8
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213	0.6	10	16
Methicillin Resistant <i>Staphylococcus aureus</i> NPRC 001R	1.25	20	16
<i>Staphylococcus epidermidis</i> ATCC 12228	2.5	5	2
<i>Staphylococcus epidermidis</i> ATCC 35984	2.5	10	4
<i>Staphylococcus intermedius</i> TISTR 668	1.25	5	4

3. ประสิทธิภาพการควบคุมเชื้อแบคทีเรียของสบู่เหลวผสมสารสกัดสูตรผสมที่ 4

ประสิทธิภาพของสบู่เหลวผสมสารสกัดทั้ง 4 ความเข้มข้น ต่อการลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียของหนังหมู ผลการทดลองพบว่า สบู่เหลวผสมสารสกัดที่ระดับความเข้มข้น MBC 2MBC 4MBC และ 8MBC สามารถลดจำนวนเซลล์แบคทีเรีย *S. epidermidis* ได้ดีอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 1) เมื่อเทียบกับ

การใช้สบู่เหลวปกติ เช่นเดียวกับการทดสอบกับหนังหมูที่ทำเชื้อ *E. coli* สบู่ที่ผสมสารสกัดสามารถลดจำนวนเซลล์แบคทีเรียได้ (Figure 2)

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการนำสารสกัดไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สบู่เหลว ซึ่งสบู่เหลวที่ผสมสารสกัดสามารถลดจำนวนเซลล์แบคทีเรียได้ดีกว่าสบู่เหลวปกติ ในสบู่เหลวปกติมีสารลดแรงตึงผิวซึ่งจะช่วยให้แบคทีเรียที่เกาะอยู่ที่

ผิวหนังหลุดออกไปพร้อมกับการล้างน้ำ การเพิ่มสารสกัดเข้าไปในส่วนผสมช่วยให้สบู่เหลวสามารถกำจัดเซลล์แบคทีเรียได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ การเลือกใช้สารสกัดจากไพล หรือขมิ้นชัน คณะผู้วิจัยได้คาดหวังถึงประโยชน์ของสีของสารสกัดตามภูมิปัญญาของการใช้ขมิ้นชันพอกผิว จะช่วยให้ผิวมีสีเหลืองสว่าง ผลการใช้สบู่เหลวผสมสารสกัดสูตรที่ 4 จะช่วยให้ผิวของผู้ใช้มีสีเหลืองสว่างคล้ายกับการใช้ขมิ้นทาที่ผิวหนึ่งตามภูมิปัญญาของไทย สังเกตได้จากการทดลองใช้ของคณะผู้วิจัยอีกทั้งพืชทั้ง 4 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษต่ำ สารสกัดจากไพลที่ปริมาณ 2,000 mg/kg ไม่พบความผิดปกติในหนู (Candra et al., 2019) สารสกัดจากไพลที่ความเข้มข้น 1,125 mg/kg ไม่พบความผิดปกติในหนูทดลอง (Koontongkaew et al., 2014) Soleimani et al. (2018) ได้สรุปว่า สารสกัดจากขมิ้นชันไม่มีความเป็นพิษในมนุษย์หากบริโภค 500 mg สองครั้งต่อวัน นาน 30 วัน และ Neimkhum et al. (2021) ได้รายงานว่สารสกัดจากผลมะม่วงหาวมะนาวโห่มีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นสารออกฤทธิ์ในเวชสำอาง

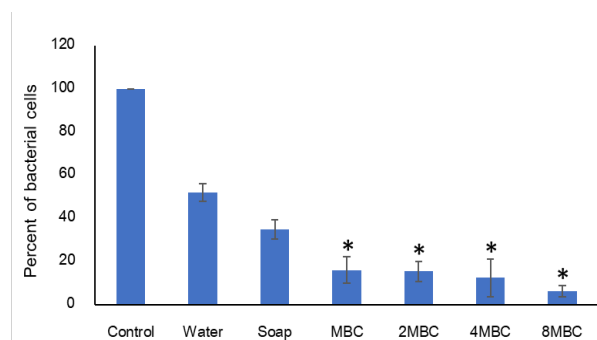


Figure 1 The effect of liquid soap mixed with various concentration of extract formula 4 on reducing the number of *S. epidermidis* cells. Data are presented as the means $\pm$ SD of three representative percent of bacterial cells. The results showed statistically significance (*, $p < 0.05$) of the differences between the 4 formulas and soap control results.

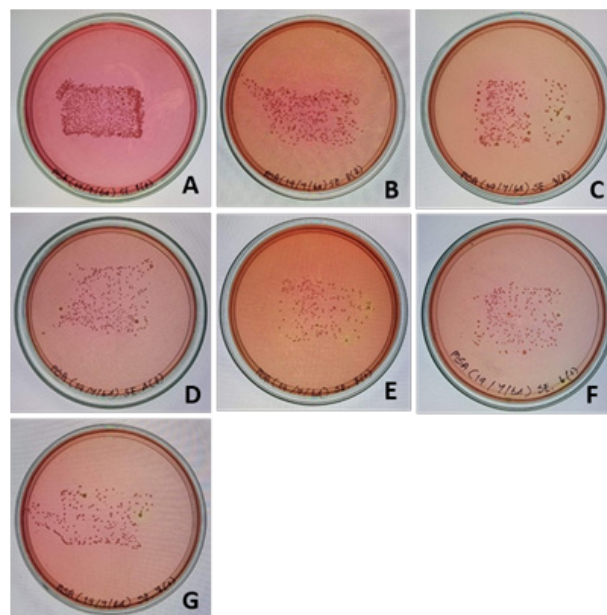


Figure 2 The effects of liquid soap mixed with various concentration of extract formula 4 on reducing the number of *S. epidermidis* cells. A; the initial amount of bacteria, B-G; the amount of bacterial remaining after washing with B, tap water; C, liquid soap; D-G, liquid soap mixed with extract formula 4 at MBC (D); 2MBC (E); 4MBC (F); 8MBC (G).

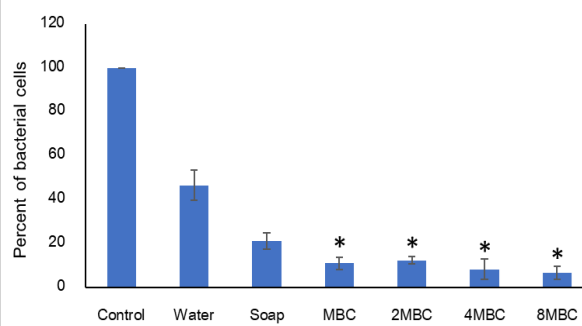


Figure 3 The effect of liquid soap mixed with different concentration of extract formula 4 on reducing the number of *E. coli* cells. Data are presented as the means $\pm$ SD of three representative percent of bacterial cells. The results showed statistically significance (*, $p < 0.05$) of the differences between the 4 formulas and soap control results.

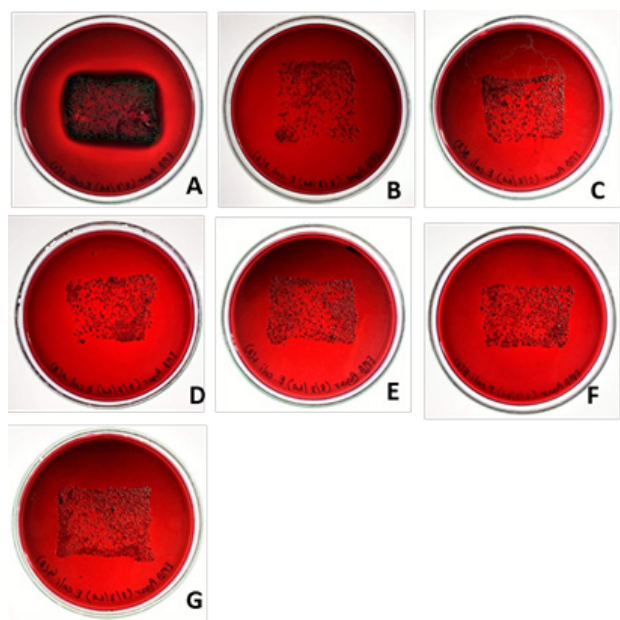


Figure 4 The effects of liquid soap mixed with various concentration of extract formula 4 on reducing the number of *E. coli* cells. A; the initial amount of bacteria, B-G; the amount of bacterial remaining after washing with B, tap water; C, liquid soap; D-G, liquid soap mixed with extract formula 4 at MBC (D); 2MBC (E); 4MBC (F); 8MBC (G).

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบรวมถึงเชื้อดื้อยาปฏิชีวนะของสารสกัดสูตรผสมของใบสัก เหง้าไพล เหง้าขมิ้นชัน ผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ ด้วยอัตราส่วนผสม 1:1:1:2 สูตรผสมนี้สามารถใช้เป็นสารออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว และประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์สำหรับควบคุมเชื้อแบคทีเรียอื่นๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 และทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยของนักศึกษา

เอกสารอ้างอิง

มณฑล วิสุทธิ. (2017). ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียกลุ่ม *Staphylococci* ของสารสกัดจากพืชท้องถิ่นบางชนิดในจังหวัดนครราชสีมา. *KKU Science Journal*, 45(4), 805-816.

มณฑล วิสุทธิ. (2019). Formulation of plant extracts for some pathogenic bacteria inhibition. *Progress in Applied Science and Technology*, 9(2), 125-135.

Candra, D. H., Eka, S. P., & Sinta, W. U. (2019). Acute toxicity of Indonesian natural food colorant *Tectona grandis* leaf extract in Wistar rats. *Journal of Medical Sciences*, 19, 69-74.

Cieplik, F., Jakubovics, N. S., Buchalla, W., Maisch, T., Hellwig, E., & Al-Ahmad, A. (2019). Resistance toward chlorhexidine in oral bacteria—is there cause for concern?. *Frontiers in Microbiology*, 10, 587.

Gonzalez, N., Sevillano, D., Alou, L., Cafini, F., Gimenez, M. J., Gomez-Lus, M. L., Prieto, J. & Aguilar, L. (2013). Influence of the MBC/MIC ratio on the antibacterial activity of vancomycin versus linezolid against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* isolates in a pharmacodynamic model simulating serum and soft tissue interstitial fluid concentrations reported in diabetic patients. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 68(10), 2291-2295.

Jampa, O., Panthong, S., & Itharat, A. (2019). Phytochemical constituents, anti-microbial, anti-inflammatory and cytotoxic activities of *Carissa carandas* L. fruit and seed extracts. *Thammasat Medical Journal*, 19(4), 654-666.

Kazimoto, T., Abdulla, S., Bategereza, L., Juma, O., Mhimbara, F., Weisser, M., Utzinger, J., von Müller, L., & Becker, S. L. (2018). Causative agents and antimicrobial resistance patterns of human skin and soft tissue infections in Bagamoyo, Tanzania. *Acta tropica*, 186, 102-106.

Koontongkaew, S., Poachanukoon, O., Sireeratawong, S., Dechatiwongse Na Ayudhya, T., Khonsung, P., Jaijoy, K., Soawakontha, R., & Chanchai, M. (2014). Safety evaluation of *Zingiber cassumunar* Roxb. rhizome extract: acute and chronic toxicity studies in rats. *International Scholarly Research Notices*, 2014,632608.

Lachapelle, J. M., Castel, O., Casado, A. F., Leroy, B., Micali, G., Tennstedt, D., & Lambert, J. (2013). Antiseptics in the era of bacterial resistance: a focus on povidone iodine. *Clinical Practice*, 10(5), 579.

- Misic, A. M., Gardner, S. E., & Grice, E. A. (2014). The wound microbiome: modern approaches to examining the role of microorganisms in impaired chronic wound healing. *Advances in wound care*, 3(7), 502-510.
- Neimkhun, W., Anuchapreeda, S., Lin, W. C., Lue, S. C., Lee, K. H., & Chaiana, W. (2021). Effects of *Carissa carandas* Linn. Fruit, pulp, leaf, and seed on oxidation, inflammation, tyrosinase, matrix metalloproteinase, elastase, and hyaluronidase inhibition. *Antioxidants*, 10(9), 1345.
- Niamsa, N., & Sittiwet, C. (2009). Antimicrobial activity of *Curcuma longa* aqueous extract. *Journal of Pharmacology and Toxicology*, 4(4), 173-177.
- Prajuabjinda, O., Panthong, S., & Itharat, A. (2012). Antimicrobial activity of Thai medicinal preparation of Khampramong Temple used for cancer treatment and its plant components. *Journal of the Medical Association of Thailand*, 95, S159-65.
- Soleimani, V., Sahebkar, A., & Hosseinzadeh, H. (2018). Turmeric (*Curcuma longa*) and its major constituent (curcumin) as nontoxic and safe substances. *Phytotherapy Research*, 32(6), 985-995.
- Taechowisan, T., Suttichokthanakorn, S., & Phutdhawong, W. S. (2018). Antibacterial and cytotoxicity activities of phenylbutanoids from *Zingiber cassumunar* Roxb. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 8(7), 121-127.
- Temrangsee, P., Kondo, S., & Itharat, A. (2011). Antibacterial activity of extracts from five medicinal plants and their formula against bacteria that cause chronic wound infection. *Journal of the Medical Association of Thailand*, 94, S166-71.
- Visutthi, M. (2016). Anti-bacterial and anti-quorum sensing properties of selected medicinal plants from Nakhon Ratchasima Province, Thailand. *Progress in Applied Science and Technology*, 6(1), 1-13.

การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและปริมาณธาตุอาหารหลักในวัสดุเลี้ยงด้วงมะพร้าว

The isolation of cellulase producing bacteria and macronutrient components in coconut weevil feed

พรชนก บุญลับ^{1*}, นภััสสร วงเปรี้ยว² และ กิตติ ดันเมืองปัก¹

Pornchanok Boonlub^{1*}, Napatsorn Wongpriaw² and Kitti Tanmuangpak¹

Received: 12 August 2023 ; **Revised:** 19 September 2023 ; **Accepted:** 18 October 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส และศึกษาปริมาณธาตุอาหารสำคัญในวัสดุเลี้ยงด้วงมะพร้าว 5 ตัวอย่าง สามารถคัดแยกแบคทีเรียได้ 108 ไอโซเลท และพบว่าสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ 22 ไอโซเลท โดยมีแบคทีเรียจำนวน 15 ไอโซเลท (ร้อยละ 13.89) ที่มีประสิทธิภาพในการสร้างเอนไซม์อยู่ในระดับสูง มีค่า HC value เท่ากับ 2.01-3.00 โดยไอโซเลท SA05 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปท่อน มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์สูงที่สุดมีค่า HC value เท่ากับ 3.00 และเมื่อนำวัสดุเลี้ยงด้วงมะพร้าวไปศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม พบว่าตัวอย่าง SA มีปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมสูงที่สุด เท่ากับ 2.20 ± 0.00 mg/kg และ 30.59 ± 2.70 mg/kg ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง SB มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุด เท่ากับ 319.48 ± 0.00 mg/kg ผลจากการวิจัยนี้พบว่าวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงด้วงมะพร้าวพบแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่ย่อยเซลลูโลส และเป็นแหล่งของธาตุอาหารหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสฟอรัสให้กับพืชได้ แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาต่อยอดในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ด้วงมะพร้าวจากวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงด้วงมะพร้าวต่อไป

คำสำคัญ: เซลลูเลส, แบคทีเรีย, ธาตุอาหารหลัก, ด้วงมะพร้าว

Abstract

The purpose of this research was to isolate cellulase producing bacteria and study the amount of Macronutrient components in 5 samples of coconut weevil feed. 22 of 108 bacterial isolates produced cellulase. Enzymatic production efficiency was high in 15 bacterial isolates (13.89%) with HC value of 2.01-3.00. The isolate SA05, a gram-positive, rod-shaped bacterium, produced the highest cellulase activity (HC value of 3.00). In addition, the macronutrient components nitrogen, phosphorus, and potassium in samples were measured. The highest amounts of nitrogen and potassium components were found in the SA sample, 2.20 ± 0.00 mg/kg and 30.59 ± 2.70 mg/kg, respectively while the highest phosphorus component in the SB sample was 319.48 ± 0.00 mg/kg. This study found that coconut weevil feed contained cellulase producing bacteria and could be a source of plant nutrients especially phosphorus. However, there should be further study in development of organic fertilizer production from waste materials from coconut beetle farming.

Keywords: Cellulase, bacteria, macronutrient, coconut weevil

¹ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ต.เมือง อ.เมืองเลย จ.เลย 42000

² สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ต.เมือง อ.เมืองเลย จ.เลย 42000

¹ Program of Biology, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Muang, Muang Loei district, Loei Province 42000

² Program of Applied Chemistry, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Muang, Muang Loei district, Loei Province 42000

* Corresponding author: E-mail: pornchanok.boo@lru.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันมีการบริโภคแมลงชนิดต่าง ๆ เป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก ตัวงวงมะพร้าว (*Rhynchophorus ferrugineus* Olivier) หรือ ตัวงวงมะพร้าว ถือเป็นแมลงอีกชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมสำหรับบริโภค เนื่องจากผู้บริโภคทั่วไปเชื่อว่าตัวงวงมะพร้าว อุดมไปด้วยโปรตีนสูงใกล้เคียงกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัย อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากตัวงวงมะพร้าวอีกด้วย (สุภาภรณ์ และบุษกรณ์, 2565) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงตัวงวง บ้านท่าสวรรค์ อ.นาด้วง จ.เลย เป็นเกษตรกรอีกกลุ่มหนึ่งที่สนใจเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว เพื่อจำหน่ายเป็นรายได้ให้กับชุมชน จนสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้เป็นอย่างดี ซึ่งในกระบวนการเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว วัตถุประสงค์สำคัญในการเพาะเลี้ยงประกอบไปด้วยเปลือกมะพร้าว รำละเอียด มันสำปะหลังบด กากน้ำตาล เป็นต้น การเพาะเลี้ยงตัวงวงนั้นใช้เวลาก่อนเข้าสันประมาณ 30-40 วัน จะได้ตัวอ่อนของตัวงวงหรือตัวหนอนและสามารถจำหน่ายได้ โดยในการเพาะเลี้ยงจะใส่วัสดุเพาะเลี้ยงลงไปในกะละมัง ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเพียงพอต่อการเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวจนได้เป็นตัวอ่อนและสามารถจำหน่ายได้ ในแต่ละกะละมังจะใส่ตัวเต็มวัยตัวงวงประมาณ 5 คู่ต่อกะละมัง ซึ่งสามารถเพาะเลี้ยงได้คราวละประมาณ 50-100 กะละมัง ตัวงวงจะผสมพันธุ์และได้เป็นตัวอ่อนออกมา ตัวอ่อนจะกินอาหารจากวัสดุเพาะและจะเจริญเป็นตัวหนอน ในขณะที่ตัวหนอนของตัวงวงมะพร้าวจะขับมูลออกมาในกะละมังเพาะเลี้ยง ซึ่งในระบบทางเดินอาหารของตัวอ่อนตัวงวงมะพร้าวมีรายงานว่าพบแบคทีเรียหลายชนิดในลำไส้ของตัวอ่อนตัวงวงมะพร้าว อีกทั้งยังพบแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสซึ่งสามารถย่อยเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกมะพร้าว ได้แก่ *Serratia enterica*, *Enterococcus cloacae*, *Raoultella* sp., *Klebsiella pneumonia* และ *Citrobacter koseri* เป็นต้น (Muhammad et al., 2017) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงตัวงวงในแต่ละรอบ จะมีวัสดุเหลือใช้เป็นจำนวนมากประมาณ 250-500 กิโลกรัม วัสดุเหล่านี้จะถูกนำไปกองทิ้งไว้ นอกโรงเรือนเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว กองทับถมกันไปเรื่อย ๆ เป็นระยะเวลากว่า 1 ปี ซึ่งผู้เลี้ยงตัวงวงมะพร้าว ได้มีการนำวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวบางส่วนไปใช้เป็นวัสดุปลูกสำหรับพืชผักสวนครัว และพบว่าพืชผักสวนครัวเจริญเติบโตได้ดี แสดงให้เห็นว่ามีแร่ธาตุที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตให้กับพืช อีกทั้งเปลือกมะพร้าวยังสามารถช่วยอุ้มน้ำ และดูดซับความชื้นได้ดีอีกด้วย จึงมีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ในปัจจุบันได้

มีการนำมูลหรือวัสดุเหลือใช้จากการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีด ซึ่งถือว่าเป็นแมลงเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย มาผลิตเป็นปุ๋ยเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดจะทำให้ได้มูลจิ้งหรีดปริมาณหนึ่งในสามส่วนของอาหารที่กินเข้าไป อีกทั้งยังพบว่ามูลจิ้งหรีดมีธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ในปริมาณที่สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตให้กับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้อีกด้วย (ปรีชาณี พิบุารุง, 2565) ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถสร้างเอนไซม์เซลลูเลสและศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลักในวัสดุเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว ต่อยอดเป็นปุ๋ยอินทรีย์ต่อไป

การทดลอง

1. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จากวัสดุเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว โดยศึกษาจากตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวที่กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกองทับถมกันเป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ปี กระจายจุดเก็บตัวอย่างเป็น 5 จุด ลีกลงไปจากผิวกองวัสดุ 10 - 15 เซนติเมตร จุดละ 500 กรัม จำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง โดยจุดที่เก็บตัวอย่าง วัสดุมีลักษณะเปียกยุ่ย สีน้ำตาลเข้ม อุณหภูมิของจุดที่เก็บอยู่ในช่วง 38 - 40 องศาเซลเซียส และมีความชื้นเหมาะสม กว๊าสสุแล้วยังคงเกาะติดกันเป็นก้อน เก็บตัวอย่างใส่ถุงซิปล็อคปลอดเชื้อ เก็บรักษาในกล่องโฟมบรรจุน้ำแข็งก่อนนำไปศึกษาในห้องปฏิบัติการ-

2. การคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากปุ๋ยมูลตัวงวงมะพร้าว

2.1 การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวที่เหลือใช้จากกระบวนการเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าว ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงตัวงวง บ้านท่าสวรรค์ อ.นาด้วง จ.เลย โดยวัสดุเพาะเลี้ยงตัวงวงมะพร้าวประกอบไปด้วยวัสดุหลักคือ เปลือกมะพร้าว โดยเปลือกมะพร้าวได้รับมาจากผู้ประกอบการไอศกรีมกะทิสดที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ๆ กับที่ทำการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงตัวงวง ซึ่งจะมีเปลือกมะพร้าวเหลือทิ้งจากการผลิตไอศกรีมเป็นจำนวนมาก จากนั้นเปลือกมะพร้าวจะถูกนำมาสับให้มีขนาดเล็ก เติรมด้วยสารอาหารจากโปรตีน และมันสำปะหลังบด อัตราส่วน 10:1:1 จากนั้นนำไปใส่ในกะละมังประมาณครึ่ง

กะละมัง ตัดกล้วยน้ำว้าสุกประมาณ 3-5 ลูกให้เป็นแว่น วางกระจายไว้บนผิวหน้าวัสดุเพาะเลี้ยง ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการเพาะเลี้ยงดั่งและเก็บผลผลิต จะเหลือวัสดุเพาะเลี้ยงที่เป็นเปลือกมะพร้าว โดยดั่งมะพร้าวจะกินเปลือกมะพร้าวและกล้วยน้ำว้าสุกเป็นอาหาร จากนั้นขับของเสียออกมาสะสมในวัสดุเพาะเลี้ยง โดยวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าวหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเพาะเลี้ยงในทุกรอบ จะถูกนำมากองทับถมไว้บริเวณนอกโรงเรือนที่ใช้เพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว เป็นระยะเวลาเกินกว่า 1 ปี มีลักษณะเป็นกองสูงประมาณ 1 เมตร ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากกองวัสดุเพาะเลี้ยง โดยทำการเก็บตัวอย่างลึกลงไปจากผิวกองวัสดุ 10-15 เซนติเมตร (ชนิดาภา ธารศรีราษฎร์ และคณะ, 2561) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีระดับความลึกที่สามารถพบแบคทีเรียที่ยังมีชีวิตอยู่ได้ เก็บตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 5 จุด ๆ ละ 1 ตัวอย่าง ๆ ละ 500 กรัม รวมจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยกระจายทั้ง 5 จุดให้ครอบคลุมพื้นที่กองวัสดุเพาะเลี้ยง กำหนดให้ตัวอย่างที่เก็บจากจุดที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 แทนด้วยสัญลักษณ์ SA, SB, SC, SD และ SE ตามลำดับจากนั้นนำมาตรวจสอบที่ห้องปฏิบัติการภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 การคัดแยกแบคทีเรียจากวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว

ซั่งตัวอย่าง 25 กรัม ใส่ลงในถุงปลอดเชื้อที่มี 0.85% Normal saline 225 มิลลิลิตร ตีปั่นด้วยเครื่อง Stomacher ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เจือจางตัวอย่างด้วยวิธี Ten-fold serial dilution method นำตัวอย่างมาคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Spread plate บนอาหาร Nutrient agar จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส สังเกตลักษณะโคโลนีที่เจริญบนอาหารแข็ง คัดแยกเชื้อตามสัณฐานวิทยา โดยพิจารณาจากลักษณะการเจริญเติบโต รูปร่างและสีที่แตกต่างกัน แยกเชื้อให้บริสุทธิ์ ศึกษาลักษณะได้กล้องจุลทรรศน์ด้วย Gram staining ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (โสภณ คงสำราญ และคณะ, 2524) นำไปเก็บรักษาไว้เป็น Stock culture

3. การทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส

นำ Stock culture เชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้มาถ่ายเชื้อลงใน Nutrient broth (NB) นำไปบ่มด้วยเครื่อง Shaker incubator ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ปรับค่าความขุ่น (Optical Density: OD) ของเซลล์แบคทีเรีย ที่ความยาวคลื่น 625 นาโนเมตร ให้เท่ากับ 0.5 McFarland standard ปิเปิด

ตัวอย่างเชื้อ 0.5 ไมโครลิตร ทำการ Drop plate ลงบน Carboxymethyl cellulose (CMC) agar บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นเททับด้วย Gram's iodine (Kasana *et al.*, 2008) ให้ท่วมผิวหน้าอาหาร และโคโลนีเป็นเวลา 30 นาที แล้วเทออก ล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ และเททับอีกครั้งด้วย 1M NaCl เป็นเวลา 15 นาที Gram's iodine จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เกิดเป็นสีน้ำเงินเข้ม ส่วนบริเวณที่เกิดการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จะเกิดเป็นวงใส ซึ่งสามารถสังเกตเห็นวงใสได้ชัดเจนกว่าการใช้ 1% hexadecyltrimethyl ammonium bromide หรือ 0.1% Congo red ซึ่งจะใช้เวลาในการอ่านผลนานกว่า (Kasana *et al.*, 2008) จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนี และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใส เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส (hydrolysis capacity; HC value) จากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางวงใสต่อเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี (ชนิดาภา ธารศรีราษฎร์ และคณะ, 2561) โดยกำหนดให้ ระดับ 1 หมายถึง HC value มีค่าน้อยกว่า 1.00 ระดับ 2 หมายถึง HC value มีค่าอยู่ระหว่าง 1.01-2.00 ระดับ 3 หมายถึง HC value มีค่าอยู่ระหว่าง 2.01-3.00 และระดับ 4 หมายถึง มีค่า HC value มากกว่า 3.00 ทำการทดลอง 4 ซ้ำ

4. การวิเคราะห์ธาตุอาหารในวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว

ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว โดยนำตัวอย่างมาทำการอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ บดให้ละเอียด และนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี Kjeldahl method วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ด้วยวิธี Bray II (Bray & Kurtz, 1945) และวิเคราะห์ปริมาณ โพแทสเซียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Suwannarong, 2004) วัดปริมาณแร่ธาตุในแต่ละตัวอย่าง 5 ซ้ำ นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณหาความเข้มข้นของธาตุอาหารโดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

5. การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Method Validation)

5.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity)

เตรียมสารละลายมาตรฐานของฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) มาจำนวน 7 ความเข้มข้น แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์

ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้น แล้วคำนวณหาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งค่า R^2 จะต้องไม่ต่ำกว่า 0.9950 (ICH, 2005)

5.2 การวิเคราะห์ร้อยละการกลับคืน (percentage recovery)

การทดสอบความถูกต้องจะใช้วิธี Standard addition ทำการวิเคราะห์โดยการเติมสารละลายมาตรฐานลงในสารละลายตัวอย่าง (spiked sample) จากนั้นนำสารละลายผสมไปทำการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้ง แล้วคำนวณหาการกลับคืนซึ่งค่าร้อยละการกลับคืนที่ผ่านเกณฑ์ควรอยู่ในช่วง 80-115% (AOAC, 2002)

5.3 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่สามารถตรวจวัดได้ (LOD) และการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่วิเคราะห์ที่สามารถตรวจหาปริมาณได้ (LOQ)

ใช้วิธีการคำนวณจากสัญญาณของ sample blank ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด โดยทำการวิเคราะห์ sample blank 11 ซ้ำ จากนั้นคำนวณค่าความเข้มข้นจากความเข้มข้นเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ sample blank โดยทั่วไป LOD มีค่าประมาณ 3 เท่า และ LOQ จะมีค่าเป็น 10 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสารละลาย blank (ทิพวรรณ นิ่งน้อย, 2549)

5.4 การวิเคราะห์ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

นำตัวอย่างมาทำการทดสอบซ้ำจำนวน 10 ซ้ำ แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ นำผลที่ได้จากการคำนวณมาคำนวณหาการร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ซึ่งค่า %RSD ที่ได้ไม่ควรเกิน 11% (AOAC, 2002)

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ ANOVA วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Scheffe โดยใช้โปรแกรม SPSS และกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ $P\text{-value} \leq 0.05$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การคัดแยกแบคทีเรียจากวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว

การคัดแยกแบคทีเรียจากตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าว จำนวน 5 ตัวอย่าง พบว่าแบคทีเรียที่คัดแยกได้

มีลักษณะโคโลนีที่หลากหลาย (Figure 1) ในด้านของ ขนาดโคโลนี ผิวโคโลนี ขอบโคโลนี และรงควัตถุที่สร้าง ทำให้สามารถคัดแยกแบคทีเรียได้ 108 ไอโซเลท โดยตัวอย่าง SA, SB, SC, SD และ SE สามารถคัดแยกแบคทีเรียได้ 23, 19, 19, 22 และ 25 ไอโซเลท ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของแบคทีเรียในวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงดั่งมะพร้าว จำนวนไอโซเลทที่คัดแยกได้จากแต่ละจุดมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่มีจำนวนน้อย อาจเนื่องมาจากบริเวณที่ผู้เลี้ยงดั่งก่องวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงดั่งมะพร้าว เป็นบริเวณที่อยู่นอกโรงเรือนเลี้ยงดั่งมะพร้าวและได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน เพื่อใช้ความร้อนในการทำวัสดุให้แห้ง เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการเลี้ยงดั่งมะพร้าว วัสดุจะถูกกักกั้นโดยตัวเดิมวัยและตัวอ่อนของดั่งมะพร้าว รวมไปถึงขับของเสียออกมาสะสมในวัสดุเพาะเลี้ยง อีกทั้งความชื้นและวัตถุดิบที่ใส่เป็นส่วนผสมทำให้วัสดุเพาะเลี้ยงมีกลิ่นค่อนข้างรุนแรง จึงจำเป็นต้องนำวัสดุที่เหลือใช้จากการเลี้ยงดั่งมะพร้าวมากองตากแดดให้แห้งเพื่อเป็นการลดกลิ่น และเมื่อกองวัสดุทับถมกันเป็นเวลานานพบว่า เปลือกมะพร้าวที่เป็นวัตถุดิบหลักมีลักษณะเปียกชื้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายเปลือกมะพร้าวเกิดขึ้น โดยแบคทีเรียที่มีส่วนช่วยในการย่อยสลายส่วนหนึ่งอาจมาจากของเสียที่ดั่งมะพร้าวขับออกมาเนื่องจากในลำไส้ของดั่งมะพร้าวมีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (Microflora) หลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Enterobacteriaceae, *Leminorella grimontii*, *Erysipelothrix*, *Lactobacillus* และ *Leuconostoc* (Farah et al., 2018) และยังสามารถพบแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้หลายชนิด ได้แก่ *Serratia marcescens*, *Enterobacter cloacae*, *Raoultella* sp., *Klebsiella pneumonia*, *Klebsiella variicola*, *Klebsiella oxytoca* และ *Citrobacter koseri* (Muhammad et al., 2017) ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายในวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าวเมื่อเกิดการทับถมกันเป็นเวลานาน ในสภาพที่อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม



Figure 1 Characteristics of isolated bacterial colonies on CMC Agar

การทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์ เซลลูเลสของเชื้อแบคทีเรีย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส พบแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ 22 ไอโซเลท (ร้อยละ 20.37) ซึ่งเมื่อกำหนดหาประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส (HC value) พบแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส อยู่ในระดับ 2 (** = 1.01-2.00) จำนวน 7 ไอโซเลท (ร้อยละ 6.48) และแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส อยู่ในระดับ 3 (***) = 2.01-3.00) มี 15 ไอโซเลท (ร้อยละ 13.89) ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1 อาจเนื่องมาจากเอนไซม์เซลลูเลส มีคุณสมบัติเป็น inducible enzyme สามารถถูกชักนำให้เกิดการสร้างเอนไซม์ได้ด้วยซับสเตรทที่เหมาะสม (Meenu *et al.*, 2014) โดยซับสเตรท ของเอนไซม์เซลลูเลสคือเซลลูโลสที่เป็นส่วนประกอบสำคัญเปลือกมะพร้าวที่เป็นส่วนประกอบหลักในวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าว จึงทำให้สามารถพบแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่มีประสิทธิภาพสูงได้ และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเศษวัสดุเหลือใช้

ทางการเกษตรเป็นแหล่งของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ ดังเช่นงานวิจัยของ ชนิตาภาชนะศรีราษฎร์ และคณะ (2561) ซึ่งพบแบคทีเรียสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสในดินบริเวณรอบรากพืชและเศษวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ใบอ้อย ชานอ้อย ฟางข้าว และทะลายปาล์ม 79 ไอโซเลท และพบว่าแบคทีเรียที่มีค่า HC value ≥ 3 จำนวน 25 ไอโซเลท (ร้อยละ 25) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วหากมีค่า HC value สูง ประสิทธิภาพของเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยสลายซับสเตรทสูง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสของแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น (ปรีชา ยอดยิ่ง และคณะ, 2562) ดังนั้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในสภาวะที่มีปริมาณซับสเตรท อุณหภูมิ ความชื้น และ pH ที่เหมาะสม จะช่วยส่งเสริมให้แบคทีเรียสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่มีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในเปลือกมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าว ทำให้เกิดการย่อยสลายและปลดปล่อยแร่ธาตุในวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวได้อีกด้วย

Table 1 Cellulase enzyme production efficiency of isolated bacteria

Isolate no.	Gram staining	Shape	HC value	Assessment of the level of cellulase production
SA02	Gram positive	Rod	1.83	**
SA05	Gram Positive	Rod	3.00	***
SA07	Gram positive	Rod	2.17	***
SA13	Gram positive	Rod	2.00	**
SA21	Gram Negative	Rod	2.36	***
SA22	Gram Negative	Short rod	2.71	***
SB03	Gram Negative	Short rod	1.83	**
SB05	Gram positive	Rod	1.83	**
SB17	Gram positive	Rod	2.17	***
SB19	Gram positive	Rod	2.83	***
SC10	Gram Negative	Rod	2.17	***
SC17	Gram positive	Rod	1.67	**
SC21	Gram Negative	Rod	2.50	***

Table 1 Cellulase enzyme production efficiency of isolated bacteria (Continue)

Isolate no.	Gram staining	Shape	HC value	Assessment of the level of cellulase production
SD01	Gram Negative	Rod	2.20	***
SD03	Gram Negative	Rod	1.13	**
SD07	Gram positive	Rod	2.29	***
SD13	Gram positive	Rod	2.42	***
SE01	Gram positive	Rod	1.67	**
SE03	Gram positive	Rod	2.07	***
SE04	Gram positive	Rod	2.60	***
SE17	Gram positive	Rod	2.14	***
SE23	Gram Negative	Rod	2.33	***

* represent HC value < 1.00, ** HC value as 1.01 - 2.00 and *** HC value as 2.01 - 3.00

แบคทีเรียทั้ง 22 ไอโซเลท เมื่อตรวจสอบได้ กล้องจุลทรรศน์ พบว่าเป็นแบคทีเรียแกรมบวกจำนวน 13 ไอโซเลท (ร้อยละ 59.09) รูปร่างท่อน และแบคทีเรียแกรมลบ 9 ไอโซเลท (ร้อยละ 40.91) รูปร่างท่อน และท่อนสั้น โดยการที่พบแบคทีเรียแกรมบวกมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบอาจเนื่องมาจากโครงสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีความหนาแน่นมากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ จึงทำให้สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ และจากผลการทดลองพบแบคทีเรียที่มีค่า HC value สูงที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ แบคทีเรียไอโซเลท SA05 และ SB19 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างท่อน ส่วน SA22 เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างท่อน (Figure 2) โดยแบคทีเรียที่พบในธรรมชาติ มีโอกาสที่จะพบแบคทีเรียรูปร่างท่อนได้มากกว่าพวกรูปร่างท่อนสั้น เนื่องจากแบคทีเรียที่มีรูปร่างท่อนจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่ารูปร่างกลม ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนสารอาหารกับสภาพแวดล้อมได้ดีกว่ารูปร่างกลม จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้พบแบคทีเรียรูปร่างท่อนและท่อนสั้นในตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าวได้ และหากเป็นพวกแบคทีเรียรูปร่างท่อนและสร้างเอนโดสปอร์ได้ จะยิ่งช่วยส่งเสริมให้สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และสามารถอยู่รอดได้ดีอีกด้วย เช่นแบคทีเรียสกุล *Bacillus* เป็นต้น

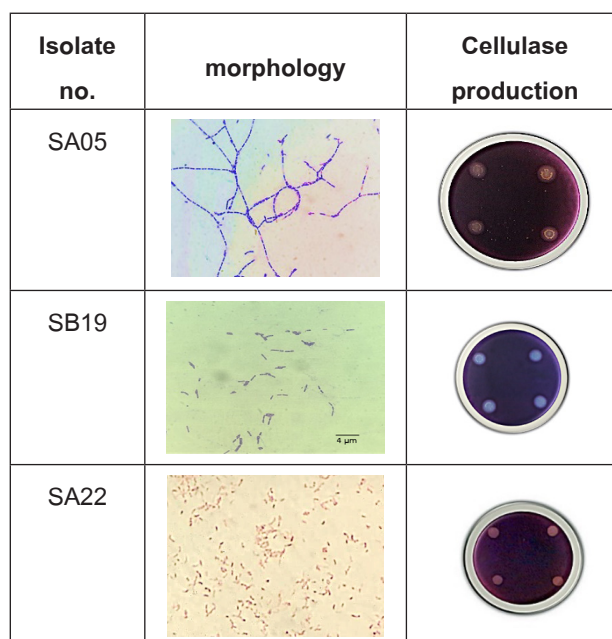


Figure 2 Bacterial morphology under a 1000x magnification microscope and cellulase production of SA05 SB19 และ SA22

แบคทีเรียที่มีรายงานว่าพบในซากวัสดุเหลือใช้ การเกษตรที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ และมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสูง มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยสามารถพบได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *Bacillus subtilis* (G+) (Deka et al., 2011) *Alcaligenes* sp. (G-) (ปรีชา ยอดยิ่ง และคณะ, 2562) *Enterococcus* sp. (G-) (ชนิดาภา ธนะศรีราษฎร์ และคณะ, 2561) *Thermobifida fusca* (G+) *Ruminococcus albus* (G+) *Thermobispora*

bispara (G+) *Erwinia chrysanthemi* (G-) *Clostridium* spp. (G+) *Cellulomonas* spp. (G+) *Acetivibrio cellulolyticus* (G+) (Sadhu *et al.*, 2013) ซึ่งประสิทธิภาพของเอนไซม์เซลลูเลสจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเชื้อราที่ดัดแยกได้จากซากปาล์มน้ำมัน มีประสิทธิภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งได้แก่ *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *Penicillium funiculosum* *P. janthinellum*, *A. tubingenis*, *Trichoderma harzianum* และ *T. inhamatum* (พิมพ์ชนา วงศ์พิศาล และคณะ, 2559) ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายเศษวัสดุทางการเกษตรหรือใช้ในการเร่งการย่อยสลายเศษซากพืชในปุ๋ยหมักได้อีกด้วย

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าว

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในตัวอย่างจากทั้ง 5 จุด พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $P \leq 0.05$ ซึ่งความแตกต่างของปริมาณธาตุอาหารอาจเนื่องมาจาก ตัวอย่างจากทั้ง 5 จุด เกิดจากแบคทีเรียในวัสดุเพาะเลี้ยง ซึ่งแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสออกมาย่อยสลายวัสดุ ส่วนหนึ่งมาจากมูลของตัวอ่อนของด้วงมะพร้าว และอีกส่วนอาจปะปนมากับวัตถุดิบที่ใช้ผสมรวมกันเป็นวัสดุเพาะเลี้ยง ซึ่งในแต่ละรอบของการเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าว แบคทีเรียดังกล่าวอาจมีความหลากหลายทั้งในด้านของจำนวน ชนิดและประสิทธิภาพของเอนไซม์เซลลูเลสที่แบคทีเรียผลิต อีกทั้งปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่อาจส่งผลกระทบ ได้แก่ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งในแต่ละจุดเก็บตัวอย่างจะได้รับปริมาณความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวัน ส่งผลถึงความชื้นในกองวัสดุ ซึ่งทั้งความร้อนและความชื้น เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสิ้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลัก พบว่าปริมาณธาตุอาหารหลักที่พบสูงที่สุดคือ ฟอสฟอรัส รองลงมาคือ โพแทสเซียม และไนโตรเจน ตามลำดับ โดยตัวอย่างจุด

SB มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงที่สุดเท่ากับ $319.48 \pm 0.00^\circ$ mg/kg ดังแสดงใน Table 2 การที่พบปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าธาตุอาหารหลักชนิดอื่น อาจเนื่องมาจากฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิก เอนไซม์ โคเอนไซม์ นิวคลีโอไทด์ และฟอสโฟลิปิดที่สามารถพบได้ในพืช ซึ่งวัสดุที่เป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวคือ เปลือกมะพร้าว ซึ่งเมื่อถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่สร้างจากแบคทีเรียจะทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสู่วัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวได้สูงกว่าธาตุอาหารหลักชนิดอื่น โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชทั่วไปอยู่ในช่วง 25-40 mg/kg (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547) ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่พบในตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวอยู่ในระดับที่สูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งเสริมฟอสฟอรัสให้กับพืช เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโตของราก และช่วยเพิ่มความต้านทานต่อโรคพืชได้ อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการออกดอกและผล การติดเมล็ด การพัฒนาเมล็ดและผล และมีส่วนช่วยในการเร่งการสุกแก่ของผลให้เร็วขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

ตัวอย่างจุด SA มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และไนโตรเจนทั้งหมดสูงที่สุด เท่ากับ $30.59 \pm 2.70^\circ$ mg/kg และ $2.20 \pm 0.00^\circ$ mg/kg ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่พืชต้องการแล้วยังถือว่าอยู่ในระดับต่ำมาก (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547) ซึ่งโพแทสเซียมที่สามารถพบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายของหินและแร่ เกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปของไอออนที่สามารถดึงดูดยึดไว้ที่พื้นผิวของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียว ซึ่งในวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวมีเพียงแค่ เปลือกมะพร้าว รำละเอียด มันสำปะหลังบด และกากน้ำตาล จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พบโพแทสเซียมปริมาณต่ำเช่นเดียวกัน ส่วนธาตุไนโตรเจนที่สามารถพบได้ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของก๊าซ พืชจะสามารถนำมาใช้ได้เมื่อไนโตรเจนถูกตรึงด้วยแบคทีเรียบางชนิดที่พบในรากพืชตระกูลถั่ว หรือพบในดิน จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พบไนโตรเจนในวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะเลี้ยงด้วงในปริมาณต่ำ

Table 2 Nitrogen, Phosphorus and Potassium contents in Coconut weevil feeding material

Sample	Macronutrient contents in sample (n=5)		
	Nitrogen (mg/kg)	Phosphorus (mg/kg)	Potassium (mg/kg)
SA	2.20 ± 0.00 ^c	309.78 ± 0.70 ^b	30.59 ± 2.70 ^c
SB	1.85 ± 0.00 ^b	319.48 ± 0.00 ^c	22.94 ± 5.41 ^a
SC	1.85 ± 0.00 ^b	316.23 ± 0.70 ^c	26.00 ± 1.71 ^b
SD	0.28 ± 0.00 ^a	308.52 ± 0.87 ^b	22.94 ± 2.70 ^a
SE	0.59 ± 0.00 ^a	299.49 ± 0.53 ^a	25.23 ± 2.09 ^b

Remark; ^{a, b, c} Different letters indicates a difference statistically significant at $p \leq 0.05$ (a, b, c show the experimental values in order from least to most)

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (method validation)

จากการศึกษาการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $R^2 \geq 0.995$ ซึ่งผ่านเกณฑ์การทดสอบโดย ICH (2005) กำหนดไว้ส่วนการร้อยละการกลับคืน (% Recovery) ของการวิเคราะห์ปริมาณ ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียมจากการทดลองในการศึกษานี้จะใช้วิธี Standard addition พบว่ามีค่าร้อยละการกลับคืนของการวิเคราะห์อยู่ที่ 97.87 และ 89.07 ตามลำดับ ดังนั้นผลการวิเคราะห์จึงผ่านเกณฑ์โดย AOAC (2002) กำหนดให้ค่าร้อยละการกลับคืน

ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 80.00-115.00 % ผลการวิเคราะห์ ค่า LOD และ LOQ ของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม พบว่า LOD ที่ทำโดยวิธีการคำนวณจากสัญญาณของ sample blank ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด โดยทำการวิเคราะห์ sample blank 11 ซ้ำ โดยที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ ที่ระดับ 0.0049 และ 0.0004 ppm และผลการทดสอบ LOQ โดยวิธีการคำนวณจากสัญญาณของ sample blank จากการคำนวณพบค่า LOQ ที่ระดับ 0.0613 และ 0.0043 ppm จากผลวิเคราะห์พบว่ามีค่า %RSD ของตัวอย่างในการวิเคราะห์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (Table 3) แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้น่าเชื่อถือและยอมรับได้

Table 3 % Recovery, data analysis and analytical performance determination

Macronutrients	R ²	% Recovery	LOD	LOQ	% R.S.D
Phosphorus	0.9984	97.87	0.0049	0.0163	0.37
Potassium	0.9996	89.07	0.0004	0.0043	6.21

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวัสดุเหลือใช้จากการเลี้ยงด้วงมะพร้าว พบว่าสามารถคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ ซึ่งเอนไซม์นี้จะย่อยสลายเซลลูโลสในเปลือกมะพร้าวที่เป็นวัสดุเพาะเลี้ยง จะทำให้เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหาร โดยแบคทีเรียที่คัดแยกได้มีระดับในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสในระดับสูง คิดเป็นร้อยละ 13.89 ดังนั้นแบคทีเรียเหล่านี้สามารถนำไปต่อยอดเป็นหัวเชื้อในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ต่อไปได้ และจากการตรวจสอบปริมาณธาตุอาหารหลักในวัสดุเหลือใช้จากการเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าว พบว่ามีธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งพบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในระดับสูง จึงสามารถนำไปใช้ในการเสริมแร่ธาตุให้กับดินที่

มีฟอสฟอรัสต่ำ เพื่อช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตให้กับพืชได้ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณฟอสฟอรัสที่พบในวัสดุเพาะเลี้ยงด้วงมะพร้าวนั้นมีปริมาณที่เหมาะสมสำหรับใช้พัฒนาเป็นวัสดุปรับปรุงดินและหากต้องการต่อยอดผลิตภัณฑ์ ควรมีการเสริมปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมเพื่อต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ดินผสมพร้อมปลูก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษากิจกรรมเอนไซม์เซลลูเลสของแบคทีเรียในสภาวะต่าง ๆ เพื่อให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายเซลลูโลสในพืช

2. ควรระบุชนิดของแบคทีเรีย พร้อมตรวจสอบความไม่เป็นพิษในคน สัตว์ และพืช เพื่อนำไปต่อยอดผลิตเป็นหัวเชื้อ สำหรับใช้เป็นเชื้อตั้งต้นในกระบวนการหมักปุ๋ยอินทรีย์ได้

3. หากต้องการนำวัสดุเหลือใช้จากการเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าวไปต่อยอดสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ควรมีการเสริมปริมาณธาตุฟอสฟอรัส ไนโตรเจนและโพแทสเซียมให้กับวัสดุเพาะเลี้ยง เพื่อการใช้ประโยชน์ พัฒนาต่อยอดไปเป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ในการทำวิจัย และทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย และขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงดั่งมะพร้าว ต.ท่าสวรรค์ อ.นาด้วง จ.เลย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างวัสดุเพาะเลี้ยงดั่งมะพร้าวในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. (2553). *ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช*. http://oss101.lidd.go.th/web_soils_for_youth/s_prop_nutri02.htm

ชนิตาภา ณะศรีราษฎร์, เพชรดา ปินใจ, และพิลาณี ไวกนอมสัตย์ (2561). การคัดเลือกแบคทีเรียผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและประสิทธิภาพในการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลส. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 36(3), 1-12.

ทิพวรรณ นิ่งน้อย. (2549). *แนวปฏิบัติการทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ทางเคมีโดยห้องปฏิบัติการเดียว* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. (2541). *จุลชีววิทยาทั่วไป*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปรีชา ธิบารุง (2565). ผลการใช้ปุ๋ยหมักมูลจิ้งหรีดและมูลหอนกนกอัดเม็ดต่อสมบัติดินและผลผลิตข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, 39(1), 52-64.

ปรีชา ยอดยิ่ง, ศิริณา ทองดอนน้อย, และสิรินภา ช่วงโอกาส (2562). การคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายเซลลูโลสและประสิทธิภาพของการย่อยสลายซังข้าวโพดและผักตบชวาที่ใช้เป็นขับสเตรต. *แก่นเกษตร*, 47(1), 177-186.

พิมพ์ชนา วงศ์พิศาล, พรศิลป์ สีเผือก, ชัยสิทธิ์ ปรีชา และวุฒิชัย สีเผือก. (2559). การคัดเลือกเชื้อราที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซแลนเนสจากซากปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jac.). *แก่นเกษตร*, 44(1), 948-952.

วัลลีย์ อมรพล, พินิจ กัลยาธิลปิน, ศุภกาญจน์ ล้วนมณี, ศรีสุดา ทิพย์รักษ์, และกอบเกียรติ ไพศาลเจริญ. (2555). การจัดการธาตุอาหารพืชที่เหมาะสมเพื่อการผลิตอ้อยในดินทรายภาคตะวันออก. *แก่นเกษตร*, 40(3), 141-148.

โสภณ คงสำราญ, อรอนงค์ พริ้งสุลกะ, และนงลักษณ์ สุวรรณพินิจ. (2524). *แบคทีเรียทางการแพทย์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). โรงพิมพ์พิมพ์เกษตร.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. (2547). *คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์ เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า* (พิมพ์ครั้งที่ 1). ดับบลิว.เจ. พร็อพเพอร์ตี้ จำกัด.

AOAC. (2002). *AOAC guidelines for single laboratory validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals*. Official Analytical Chemists, Arlington.

Bray, R.H., & Kurtz, L.T. (1945). Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-45.

Deka, D., Bhargav, P., Sharma, A., Goyal, D., Jawed, M., & Goyal, A. (2011). Enhancement of cellulase activity from a new strain of *Bacillus subtilis* by medium optimization and analysis with various cellulosic substrates. *Enzyme Research*, 2011, 1-8.

Farah N., R., Shafinaz, M. N., & Wahida, O. (2018). Preliminary study of gut bacterial abundance in *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Dryophthoridae) fed on different diets. *Serangga*, 23(1), 126-138.

ICH. (2005). *Harmonized tripartite guideline validation of analytical procedures: text and methodology Q2(R1)*. <https://database.ich.org/sites/default/files/Q2%28R1%29%20Guideline.pdf>

Kasana, R.C., Salwan, R., Dhar, H., Dutt, S., & Gulati, A. (2008). A rapid and easy method for the detection of microbial cellulases on agar plates using gram's iodine. *Current Microbiology*, 57(5), 503-507.

- Meenu, K., Singh, G., & Vishwakarma, R.A. (2014). Chapter 12: Molecular mechanism of cellulase production systems in Trichoderma. In Vijai K. Gupta V.K., Schmoll, M., Herrera-Estrella, A., Upadhyay, R.S., Druzhinina, I., and Tuohy M. (Eds.), *Biotechnology and Biology of Trichoderma* (pp. 319-324). Elsevier.
- Muhammad, A., Fang, Y., Hou, Y., & Shi, Z. (2017). The gut entomotype of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (Coleoptera: Dryophthoridae) and their effect on host nutrition metabolism. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-15.
- Sadhu, S., & Maiti, T. K. (2013). Cellulase production by bacteria: A review. *Microbiology Research Journal International*, 3(3), 235-258.
- Sakka, K., Kimura, T., Karita, S., & Ohmiya, K. (2000). Molecular breeding of cellulolytic microbes, plants, and animals for biomass utilization. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 90, 227-233.
- Suwannarong, S. (2004). *Analysis of plant nutrient* (2nd ed.). Kasetsart University.

การพัฒนาไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก

Development of soymilk ice cream mixed with pulp from ripe palmyra fruit (*Borassus flabellifer* L.)

สัญญาชัย ยอดมณี^{1*}

Sanchai Yotmanee^{1*}

Received: 18 May 2023 ; Revised: 27 September 2023 ; Accepted: 9 October 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้มุ่งพัฒนาไอศกรีมนมถั่วเหลืองโดยการผสมเนื้อผลตาลสุกในอัตราส่วนร้อยละ 0.01 0.1 และ 1 โดยน้ำหนักของนมถั่วเหลือง จากนั้นนำไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี Quantitative descriptive analysis (QDA) เปรียบเทียบผลการทดลองกับไอศกรีมหน้านมถั่วเหลืองสูตรควบคุมที่ไม่ผสมเนื้อผลตาลสุก ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มเนื้อผลตาลสุกส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ($p \leq 0.05$) ค่าการขึ้นฟูมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้อัตราการละลายมีแนวโน้มสูงขึ้น และเนื้อสัมผัสของไอศกรีมหน้านมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีค่าความแข็งและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มเนื้อผลตาลสุกช่วยให้ไอศกรีมมีค่า a^* และ b^* สูงขึ้น ผลการประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าสี กลิ่นเหม็นเขียว ความหวาน เนื้อสัมผัส และขนาดของผลึกน้ำแข็งระหว่างตัวอย่างไอศกรีมทุกสูตรไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ในขณะที่ไอศกรีมหน้านมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกร้อยละ 1 มีระดับความเข้มข้นของกลิ่นผลตาลสุกมากกว่าไอศกรีมหน้านมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ($p \leq 0.05$) ถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติบ่งชี้ว่ากลิ่นเหม็นเขียวในไอศกรีมทุกสูตรมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยด้านการรับรู้กลิ่นเหม็นเขียวในไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้เนื้อผลตาลสุกเพื่อกลบกลิ่นเหม็นเขียวจากหน้านมถั่วเหลือง

คำสำคัญ: ไอศกรีม, นมถั่วเหลือง, ผลตาล

Abstract

This research developed soymilk ice cream (SMI) mixed with pulp from ripe Palmyra fruit (RPF) in amounts of 0.01, 0.1 and 1%, by weight of soymilk. Chemical compositions, physical properties and sensory quality (quantitative descriptive analysis, QDA) of the ice cream samples were analyzed and compared with the control sample (without RPF added). The results showed that an increase in RPF resulted in an increase in viscosity of SMI-RPF ($p \leq 0.05$). The overrun of SMI-RPF samples was likely declined, thus resulting in an increase in their melting rate, hardness and adhesiveness of SMI-RPF. Moreover, increased RPF promoted increases in a^* and b^* found in SMI-RPF. The results from the sensory quality assessment showed that there were no statistical differences in colour, foul-smell, sweet taste, texture and ice crystal size between all ice cream samples ($p > 0.05$), whereas the SMI mixed with 1% of RPF had a higher intensity of aroma from RPF when compared with SMI ($p \leq 0.05$). Even though the statistical analysis showed that foul-smelling was not statistically different in all ice cream samples, the average value of foul-smelling in SMI-RPF was likely declined. This showed the possibility of the utilisation of RPF to mask the foul-smelling from SMI.

Keywords: Ice cream, soymilk, palmyra fruit

¹ อาจารย์, สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

¹ Lecturer, Home Economics Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket, 83000

* Corresponding author: E-mail: sanchai.y@pkru.ac.th

บทนำ

ไอศกรีม เป็นอาหารประเภทอิมัลชัน (emulsion) ที่ผ่านการแช่แข็ง มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ไขมันจากนม ของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน (solid non fat) น้ำตาล น้ำ สารให้ความคงตัว (stabilizer) อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และกลิ่นรส (Beegum *et al.*, 2021) ส่งผลให้โครงสร้างของไอศกรีมมีความซับซ้อนประกอบด้วย เม็ดไขมัน เซลล์อากาศ ผลึกน้ำแข็ง และส่วนของเหลวที่ไม่แข็งตัว (serum phase) ซึ่งจะประกอบไปด้วย สารละลายที่มีส่วนผสมของโพลีแซคคาไรด์ โปรตีน แลคโตส และแร่ธาตุ (Ahanian *et al.*, 2014)

จากส่วนประกอบไอศกรีมข้างต้นพบว่า ไขมันของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน น้ำตาล อิมัลซิไฟเออร์ และสารให้ความคงตัว มีบทบาทต่อคุณภาพของไอศกรีม โดยส่วนประกอบแรกคือไขมันนมจะเกิดกระบวนการ fat destabilization ในระหว่างการปั่น ทำให้เม็ดไขมันแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็กเกาะบนอากาศที่แทรกภายในไอศกรีม และจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วระหว่างการแช่แข็ง เนื่องจากไขมันมีจุดเยือกแข็งสูง ส่งผลให้ฟองอากาศที่แทรกในเนื้อไอศกรีมมีความคงตัว และไอศกรีมมีการขึ้นฟูดี (Adapa *et al.*, 2000) ส่วนประกอบที่สองคือของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน โดยส่วนมากมาจากนมข้น นมผง และหางนมผง ซึ่งเป็นแหล่งของโปรตีนเคซีนและโปรตีนเวย์ โดยโปรตีนเหล่านี้จะหุ้มเม็ดไขมันไว้ ส่งผลให้ไขมันแทรกตัวกับของเหลวและอากาศได้ดี อิมัลชันในไอศกรีมจึงมีความคงตัว ส่งผลให้ไอศกรีมเนื้อสัมผัสที่ดี (Beegum *et al.*, 2021) ส่วนประกอบที่สามคือน้ำตาล เป็นของแข็งที่นอกจากจะให้ความหวานแล้ว ยังช่วยให้ไอศกรีมมีความหนืดและมีเนื้อสัมผัสดี และยังส่งผลให้จุดเยือกแข็งของไอศกรีมลดลง (Syed *et al.*, 2018) และส่วนประกอบสุดท้ายคือสารให้ความคงตัวและอิมัลซิไฟเออร์ โดยในไอศกรีมมีส่วนประกอบดังกล่าวไม่เกินร้อยละ 0.5 ช่วยให้ไอศกรีมมีความหนืด อิมัลชันมีความคงตัว ลดปริมาณการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่และผลึกแลคโตส ลดการเกิดรอยย่นบนไอศกรีมอันเกิดจากการสูญเสียความชื้นระหว่างการแช่แข็ง ชะลอการละลาย และช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่ดี (Goff *et al.*, 2013)

การบริโภคโปรตีนจากพืช (plant-based protein) กำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคมากขึ้น เนื่องจากมีกลุ่มผู้บริโภคที่มีปัญหาการแพ้โปรตีนจากนมโค (cow's milk protein allergy) และผู้บริโภคที่ไม่สามารถย่อยน้ำตาลแลคโตสในนมโค (lactose intolerant) (ณัฐภา รอดขวัญ, 2565) ซึ่งพบในคนไทยร้อยละ 70-100 (Aydar *et al.*, 2020) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นมจากพืชเป็นอาหารทางเลือกสำหรับผู้บริโภคเหล่านั้น ประกอบกับความนิยมในการรับประทานอาหารแบบวีแกนก็

กำลังเพิ่มขึ้นในกลุ่มผู้บริโภคที่สนใจเรื่องสุขภาพ หรือกลุ่มผู้บริโภคที่มีความสนใจต่อสัตว์และเหตุผลทางสิ่งแวดล้อม (Ghaderi *et al.*, 2021) การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภคกลุ่มดังกล่าว ส่งผลให้นมจากพืชโดยเฉพาะถั่วเหลืองกลายมาเป็นส่วนประกอบของไอศกรีม (Ahanian *et al.*, 2014; Ghaderi *et al.*, 2021) แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมักมีกลิ่นเหม็นเขียว หรือกลิ่นที่เรียกว่า beany odour โดยทั่วไปจะแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ lipooxygenases ซึ่งมีผลต่อการเกิดกลิ่นเหม็นเขียว หรือมีการเติมสารแต่งกลิ่นจากธรรมชาติและกลิ่นสังเคราะห์ลงในผลิตภัณฑ์ (ณัฐภา รอดขวัญ, 2565)

ตาลโตนด (*Borassus flabellifer* L.) เป็นพืชที่พบกระจายทั่วไปตั้งแต่ทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ไปจนถึงหมู่เกาะนิวกินี (Krishnaveni *et al.*, 2020) เมื่อผลตาลสุกตามธรรมชาติจะพบว่าส่วนของเนื้อตาลที่อยู่รวมกับเส้นใยจะมีสีเหลืองส้มเกิดจากแคโรทีนอยด์ (carotenoids) (Thevamirtha *et al.*, 2023) และมีกลิ่นหอมหวานจากสารประกอบที่ระเหยได้ที่เป็นอนุพันธ์ของกรดไขมัน (fatty acid-derived volatiles) อะซิติก-เอสเตอร์ (acetic acid ethyl ester) เอสเทอร์ (ester) แอลกอฮอล์ (alcohol) และกรดที่ระเหยได้ (volatile acids) (Da Silva Agostini-Costa, 2018) ดังนั้นเนื้อผลตาลสุกจึงถูกผสมในอาหารหลายชนิด เช่น ขนมตาล ขนมเค้ก ขนมไข่ปลา ขนมขี้หนู และไอศกรีม (แสงแข สพันธุ์พงศ์, 2562) งานวิจัยที่ศึกษาโดย จารุวรรณ สุนทรเสณี (2555) กล่าวว่าการพัฒนาไอศกรีมกะทิเนื้อตาลสุกด้วยการผสมเนื้อตาลสุกกับน้ำกะทิในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือ 100:800 200:700 100:900 และ 200:900 กรัมต่อกรัม พบว่าการผสมเนื้อตาลสุกต่อน้ำกะทิในสัดส่วน 100:900 กรัมต่อกรัม เป็นสูตรที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุด มีกลิ่นหอมเนื้อตาลสุกพอดี ไม่ฉุนมากเกินไปเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ จากการศึกษาของ Vengaiyah *et al.*, (2015) ได้รายงานว่าแบ่งในเนื้อของผลตาลสุกสามารถดูดซับน้ำและมีอัตราการพองตัวเมื่อผ่านความร้อน จึงกล่าวได้ว่าเนื้อผลตาลสุกสามารถเพิ่มความหนืดได้ นอกจากนี้ จริญญา อับดุลสลาม และกิตติชัย บรรจง (2560) กล่าวว่าพบเพคตินในเนื้อผลตาลสุกประมาณร้อยละ 25.96 ของน้ำหนักผล ซึ่งเพคตินมีคุณสมบัติพิเศษ คือเมื่อละลายน้ำจะพองตัวเป็นเจล ทำหน้าที่เป็นสารก่อเจล สารเพิ่มความเข้มข้นของของเหลว และสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นเนื้อตาลสุกจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจที่จะนำไปใช้เพื่อการแต่งกลิ่นไอศกรีมนมถั่วเหลือง

งานวิจัยเรื่องนี้เล็งเห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำเนื้อผลตาลสุกมาใช้เพื่อลดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในไอศกรีมนมถั่ว

เหลือง จึงเป็นที่มาของการพัฒนาไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก โดยมีความคาดหวังว่าเนื้อผลตาลสุกสามารถช่วยให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น ตลอดจนเป็นการพัฒนาอาหารที่เป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคในกลุ่มวีแกน หรือผู้บริโภคที่มีปัญหาในการรับประทานผลิตภัณฑ์จากนม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกเปรียบเทียบกับไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน

การทดลอง

1. ศึกษากระบวนการผลิต องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก

ในขั้นตอนนี้จะมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) โดยกำหนด

ตัวแปรต้นเป็นปริมาณของเนื้อผลตาลสุกในระดับที่ต่างกันร้อยละ 0.01 0.1 และ 1 ตัวอย่างไอศกรีมแต่ละสูตรจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การทำไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก

เตรียมวัตถุดิบดังนี้ นำนมถั่วเหลืองปราศจากน้ำตาลและนมผง (ฟองฟอง, ประเทศไทย) ผลตาลสุกที่หลั่นจากต้นตามธรรมชาติ มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ประมาณ 4 องศาบริกซ์ วิปปิ้งครีมปราศจากส่วนผสมของนม (Sure Whip, ประเทศอังกฤษ) น้ำตาลทราย (มิตรผล, ประเทศไทย) สารให้ความคงตัว (SEP) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) (Miss ice cream, ประเทศไทย) แป้งข้าวโพด (คนอร์, ประเทศไทย) และเกลือป่น (ปรุงทิพย์, ประเทศไทย) อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทำไอศกรีม ประกอบด้วย เครื่องปั่นไอศกรีม (Clubsweety, ประเทศไทย) และตู้แช่เยือกแข็ง (Haier, ประเทศไทย)

Table 1 The ingredients of soymilk ice cream with and without RPF.

Ingredients (%)	SMI	SMI-RPF 0.01%	SMI-RPF 0.1%	SMI-RPF 1%
soymilk	70.75	70.74	70.65	69.75
pulp from RPF	-	0.01	0.1	1
non-dairy whipping cream	17.15	17.15	17.15	17.15
white sugar	10	10	10	10
commercial stabilizer (SEP)	0.5	0.5	0.5	0.5
carboxymethyl cellulose (CMC)	0.15	0.15	0.15	0.15
corn starch	1.35	1.35	1.35	1.35
salt	0.1	0.1	0.1	0.1

ไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดัดแปลงจาก Bisla *et al.*, (2012) โดยไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐานจะถูกดัดแปลงด้วยการผสมเนื้อผลตาลสุกในอัตราส่วนร้อยละ 0.01 0.1 และ 1 ของน้ำหนักนมถั่วเหลืองดังปรากฏใน Table 1 วิธีการทำเริ่มจากการชั่งส่วนผสมทั้งหมดตามสูตร นำส่วนผสมไปให้ความร้อนปานกลางจนกระทั่งละลายเข้ากันดี แล้วใส่เนื้อผลตาลสุกลงไป จากนั้นพาสเจอร์ไรซ์ที่ 75 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที นำไปลด

อุณหภูมิด้วยน้ำแข็งทันที หลังจากไอศกรีมเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส ให้นำไปปั่นที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นไอศกรีม นาน 10 นาที จนเกิดผลึกน้ำแข็ง นำไปแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส ลักษณะไอศกรีมและเนื้อผลตาลสุกในงานวิจัยนี้แสดงดัง Figure 1 ไอศกรีมทั้งหมดจะนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนืด การขึ้นฟู การละลาย สี และเนื้อสัมผัส) และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

1.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

ความชื้น โปรตีน ไขมัน โยอาหาร และเถ้าในไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกจะถูวิเคราะห์ตามวิธีการของ AOAC (2000) จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต ดังสมการที่ 1

$$\text{carbohydrate (\%)} = 100 - (\text{moisture (\%)} + \text{protein (\%)} + \text{lipid (\%)} + \text{fiber (\%)} + \text{ash (\%)}) \quad (1)$$

1.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

1.3.1 ความหนืดของไอศกรีมเหลว

ทดสอบความหนืดในไอศกรีมเหลวหลังการบ่มตามวิธีการดัดแปลงจาก Kaya & Tekin (2001) โดยนำไอศกรีมเหลว 200 มิลลิลิตร ที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml ไปทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer รุ่น DV2TLVTJ0 (Brookfield, USA) โดยใช้หัววิเคราะห์ LV-04 ใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 150 rpm กำหนดค่า Torque ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 บันทึกค่าความหนืดของไอศกรีมเหลวเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 1 นาที

1.3.2 การขึ้นฟู (overrun)

ทดสอบอัตราการขึ้นฟูของไอศกรีมตามวิธีการดัดแปลงจาก Sofjan & Hartel (2004) โดยนำไอศกรีมเหลวหลังการบ่มบรรจุในในบีกเกอร์ให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 100 มิลลิลิตร นำไปแช่แข็งแล้วบันทึกน้ำหนักไว้ (W_1) จากนั้นเมื่อทำการปั่นไอศกรีมจนเกิดผลึกน้ำแข็ง ให้นำไอศกรีมดังกล่าวมาใส่บีกเกอร์ใบเดิมในปริมาตรเท่ากับ 100 มิลลิลิตร นำไปแช่แข็งแล้วบันทึกน้ำหนักไว้ (W_2) คำนวณหาร้อยละของการขึ้นฟูจากสมการที่ 2

$$\text{overrun (\%)} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

W_1 คือ น้ำหนักไอศกรีมเหลวหลังการบ่มที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักไอศกรีมหลังการปั่นที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (กรัม)

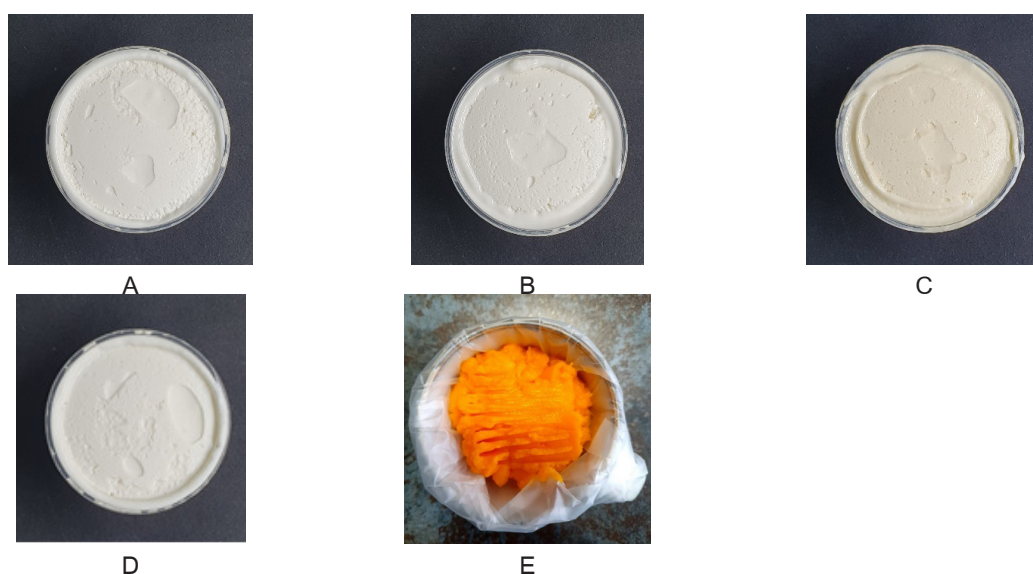


Figure 1 Characteristic of soy milk ice cream with RPF 0.01% (A), 0.1% (B) and 1% (C); SMI (D) and pulp from RPF (E)

1.3.3 อัตราการละลาย

ทดสอบอัตราการละลายของไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งตามวิธีการดัดแปลงจาก Daw & Hartel (2015) โดยนำไอศกรีมออกจากถ้วยทรงกระบอกขนาด 5 x 4.5 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว) ตัวอย่างไอศกรีมมีน้ำหนักประมาณ 70 กรัม วางบนตะแกรงลวดสี่เหลี่ยมที่มีขนาดของช่องเท่ากับ 2 x 2 เซนติเมตร ด้านล่างมีภาชนะที่ทราบน้ำหนักรองรับ

ของเหลวที่เกิดจากการละลายของไอศกรีม จับเวลาการละลายทุก ๆ 10 นาที นำของเหลวที่ได้ไปแช่แข็งแล้วบันทึกน้ำหนักไว้ ทดสอบการละลายเป็นเวลาทั้งสิ้น 60 นาที ภายในห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองที่ได้ไปทำเป็นกราฟเส้นด้วยการบันทึกค่าระหว่างน้ำหนักของไอศกรีมที่ละลายกับเวลา คำนวณหาสมการเส้นตรงโดยค่าความชันที่ได้คือค่าอัตราการละลายของไอศกรีม

1.3.4 สี

ทดสอบค่าสีในไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าสี, colorimeter (3nh, ประเทศจีน) ภายใต้ระบบ Commission Internationale de l'éclairage (CIE) ตามวิธีการของ Szkolnicka *et al.*, (2020) โดย L^* (100 หมายถึง ค่าสีขาว; 0 หมายถึง ค่าสีดำ) a^* (+ หมายถึง ค่าสีแดง; - หมายถึง ค่าสีเขียว) และ b^* (+ หมายถึง ค่าสีเหลือง; - หมายถึง ค่าสีน้ำเงิน)

1.3.5 เนื้อสัมผัส

วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งตามวิธีการดัดแปลงจาก Akbari *et al.*, (2019) กล่าวคือนำไอศกรีมที่บรรจุในถ้วยพลาสติกทรงกระบอกขนาด 5 x 4.5 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว) ไปแช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน ก่อนที่จะนำออกมาปมไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปทดสอบเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyser รุ่น CT3 10K (Brookfield, สหรัฐอเมริกา) ด้วยหัววิเคราะห์ทรงกระบอก รหัส 6F ทำการทดสอบแบบ compression น้ำหนักในการกดลงบนไอศกรีมเท่ากับ 0.07 นิวตัน ความเร็วของหัววิเคราะห์ขณะกดลงบนไอศกรีมเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะการกดลงบนไอศกรีมเท่ากับร้อยละ 50 ของความสูงของไอศกรีม บันทึกค่าความแข็งและความยืดติด

2. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก

ในขั้นตอนนี้จะมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design, RCBD) โดยกำหนดให้บล็อกคือจำนวนของผู้ประเมินที่มีประสบการณ์ ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม

ด้วยวิธี Quantitative descriptive analysis (QDA) โดยดัดแปลงจาก Peres *et al.*, (2018)

การประเมินจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ขั้นตอนการคัดกรองเบื้องต้น โดยจะทำการคัดเลือกผู้ประเมินที่มีประสบการณ์ในการทำแบบประเมิน QDA จำนวน 10 คน 2) ขั้นตอนการฝึกการประเมิน วันละ 1 ชั่วโมง 30 นาที จำนวน 3 วัน ผู้ประเมินจะต้องมาร่วมกันสร้างคำศัพท์ที่จะใช้ประเมินคุณลักษณะต่าง ๆ รวมถึงทำความเข้าใจถึงความหมายและวิธีการประเมินของคุณลักษณะนั้น โดยขั้นตอนนี้จะมีการใช้ตัวอย่างอ้างอิงมาช่วยในการคิดค้นคำศัพท์และสร้างความเข้าใจในคุณลักษณะต่าง ๆ ให้ตรงกัน (Table 2) พบว่าสามารถกำหนดคุณลักษณะสำหรับการประเมินตัวอย่างไอศกรีม จำนวน 6 ด้าน ได้แก่ สี กลิ่นผลตาลสุกกลิ่นเหม็นเขียว (foul smelling) ความหวาน เนื้อสัมผัส และขนาดของผลึกน้ำแข็ง 3) ขั้นตอนการประเมินตัวอย่างจริง โดยทำการประเมินให้แล้วเสร็จภายในหนึ่งวัน ผู้ประเมินทั้ง 10 คน ที่ผ่านขั้นตอนการฝึกประเมินมาแล้วจะทำการประเมินตัวอย่างไอศกรีมที่ละสูตรระบุความเข้มของคุณลักษณะต่าง ๆ บนเส้นตรงยาว 100 มิลลิเมตร คิดเป็น 100 คะแนน ในการประเมินตัวอย่างจริงให้ประเมินในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ตัวอย่างไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งจะถูกนำไปปรับอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง -5 ถึง 0 องศาเซลเซียส จากนั้นผู้ประเมินจะได้รับไอศกรีมประมาณ 30 กรัม พร้อมน้ำดื่มสำหรับใช้ในการทำความสะอาดช่องปาก ตัวอย่างอ้างอิงจะไม่ถูกนำมาประเมินร่วมกับตัวอย่างจริงในขั้นตอนนี้ การแปรผลจะทำโดยการวัดความยาวของจุดเริ่มต้นของเส้นตรงไปยังจุดที่ผู้ประเมินทำเครื่องหมายไว้ นั่นคือคะแนนที่ประเมินได้จากการให้คะแนนตามระดับความเข้มของแต่ละคุณลักษณะ การทดลองนี้ผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ตามเลขที่การรับรอง PKRU2564/05

Table 2 Descriptions and references used for the sensory profiling of soymilk ice cream samples

Attributes	Definition	Anchor words with scales		References
colour	Pale yellow, evaluated from the first sight on ice cream.	<u>white</u>	38	soymilk (Fong Fong)
		<u>yellow</u>	86	toddy palm cake (EZY-Sweet)
RPF odour	Aroma from natural ripe Palmyra fruit, evaluated from smelling.	<u>less</u>	27	soymilk (Fong Fong)
		<u>strong</u>	85	toddy palm cake (EZY-Sweet)
foul-smelling	Beany-like aroma, green aroma, evaluated from smelling.	<u>less</u>	14	soymilk (Fong Fong)
		<u>strong</u>	37	soymilk (local market)
sweetness	Sweet taste from sugar, evaluated from tasting	<u>less</u>	12	sugar solution 1%
		<u>strong</u>	65	sugar solution 20%

Table 2 Descriptions and references used for the sensory profiling of soymilk ice cream samples (Continue)

Attributes	Definition	Anchor words with scales		References
texture	Hardness and softness from ice cream texture, evaluated from the first bite on ice cream sample.	<u>soft</u>	6	coconut milk ice cream (Wall's)
		<u>hard</u>	55	traditional coconut milk ice cream (local market)
ice crystal size	Size of ice crystal in ice cream, evaluated from the first bite on ice cream sample.	<u>small</u>	7	coconut milk ice cream (Wall's)
		<u>large</u>	68	traditional coconut milk ice cream (local market)

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

(1) การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมจะใช้การวางแผนการทดลองแบบ

สุ่มสมบูรณ์ (2) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสจะใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี

Table 3 Chemical compositions of soymilk ice cream with and without RPF

Chemical composition (%)	SMI	SMI-RPF 0.01%	SMI-RPF 0.1%	SMI-RPF 1%
moisture	75.02±0.41 ^a	71.54±1.10 ^b	69.09±0.34 ^b	65.12±1.31 ^c
protein	0.52±0.02 ^b	0.46±0.20 ^c	0.48±0.01 ^b	0.60±0.02 ^a
lipid ^{ns}	2.49±0.15	2.32±0.07	2.43±0.03	2.36±0.23
fiber ^{ns}	0.85±0.07	0.88±0.02	0.91±0.03	0.94±0.02
carbohydrate	17.69±0.59 ^c	22.55±0.84 ^b	24.35±0.28 ^b	28.29±1.55 ^a
ash	2.16±0.17 ^c	2.71±0.47 ^b	2.76±0.11 ^b	3.38±0.18 ^a

Data are presented as means ± standard error.

Data with the different letter superscripts within each row are significantly different ($p \leq 0.05$).

ns means no significant difference between means ($p > 0.05$).

ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple-range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสด

1.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสดและไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐานแสดงใน Table 3 ผลการทดลองไม่พบความแตกต่างของใยอาหารและไขมันระหว่างตัวอย่างไอศกรีมทั้งหมด ($p > 0.05$) โดยมีใยอาหารอยู่ในช่วงร้อยละ 0.85-0.94 และมีไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ

2.32-2.49 การเพิ่มขึ้นของเนื้อมะพร้าวสดส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันเพิ่มขึ้น โดยคาดว่าอาจจะเป็นผลมาจากปริมาณของเนื้อมะพร้าวสดที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่างานวิจัยเรื่องนี้ไม่ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อมะพร้าวสด แต่ผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Behera & Nayak (2022) ที่กล่าวว่าผลตาลมีปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตประมาณร้อยละ 1.2 และ 22.5 ตามลำดับ และยังมีผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Krishnaveni *et al.*, (2020) ที่รายงานว่าผลตาลมีปริมาณไขมันใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรตประมาณร้อยละ 4.3 15 และ 18.5 ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาของ สุจิตา กิจจารเวศเสถียร (2565) ได้รายงานว่าเนื้อมะพร้าวสดมีโปรตีนประมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องนี้ที่พบว่าการผสมเนื้อมะพร้าวสด ส่งผลให้ไอศกรีมมีโปรตีนเพิ่มขึ้น

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมใน Table 4 แสดงให้เห็นว่าความหนืดของไอศกรีมทั้ง 4 สูตร มีค่าอยู่ในช่วง 3,028-3,759 เซนติพอยต์ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีค่าความหนืดสูงกว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน แสดงให้เห็นว่าเนื้อผลตาลสุกส่งผลต่อความหนืดในไอศกรีม เนื่องจากไอศกรีมที่ผสมเนื้อผลตาลสุกมีแนวโน้มพบปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตในรูปของแป้งที่พบในเนื้อผลตาลสุก สามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ส่งผลให้ไอศกรีมมีความหนืดสูงขึ้นถึงแม้ว่างานวิจัยเรื่องนี้ไม่ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อผลตาลสุก แต่ผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Vengaiyah *et al.*, (2015) ที่ได้รายงานว่าเนื้อผลตาลสุกมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 16.2 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเถ้าร้อยละ 1.2 น้ำตาลร้อยละ 22.5 แป้งร้อยละ 12.6 และโปรตีนร้อยละ 1.24 โดยองค์ประกอบดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมมีความข้นหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังได้รายงานเพิ่มเติมอีกว่าแป้งที่พบในเนื้อของผลตาลสุกสามารถดูดซับน้ำและมีอัตราการพองตัวเมื่อผ่านความร้อนเท่ากับ 4 ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเนื้อผลตาลสุกสามารถเพิ่มความหนืดได้ นอกจากองค์ประกอบข้างต้นที่ส่งผลให้ความหนืดในอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว จริญญา อับดุลสลาม และกิตติชัย บรรจง (2560) ได้รายงานพบว่าพบเพคตินในเนื้อผลตาลสุกประมาณร้อยละ 25.96 ของน้ำหนักผล เพคตินมีคุณสมบัติพิเศษ เมื่อละลายน้ำจะพองตัวทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร เพคตินที่สกัดได้จากผลเนื้อตาลสุก

มีหมู่เมทอกซิลต่ำ (low methoxyl) ส่งผลให้สามารถเพิ่มความหนืดในอาหารที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่ำ แต่ต้องมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) มากกว่าร้อยละ 3 และมี pH ในช่วง 2.9-5.5

การขึ้นฟูของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกไม่มีความแตกต่างกันกับไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน โดยมีค่าการขึ้นฟูอยู่ในช่วงร้อยละ 72.27-88.32 การเพิ่มขึ้นของความหนืดส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีการขึ้นฟูลดลง เนื่องจากเนื้อผลตาลสุกมีคาร์โบไฮเดรตใยอาหาร และเถ้า ทำให้ไอศกรีมเหลวมีความข้นหนืด การตีอากาศเข้าไปผสมกับเนื้อไอศกรีมระหว่างการปั่นจึงเกิดขึ้นได้ยากเพราะไอศกรีมเหลวก่อนแช่แข็งมีแรงตึงผิวสูง ส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าการขึ้นฟูลดลง (Kurultay *et al.*, 2010)

ไอศกรีมนมถั่วเหลืองทั้ง 4 สูตร มีอัตราการละลายอยู่ในช่วง 0.48-0.75 กรัมต่อนาที โดยที่ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีอัตราการละลายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ($p \leq 0.05$) อัตราการละลายของไอศกรีมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเนื้อผลตาลสุก เนื่องจากเนื้อของผลตาลสุกส่งผลให้ไอศกรีมมีน้ำนมถั่วเหลืองมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งขัดขวางการตีอากาศไปผสมกับไอศกรีมเหลวระหว่างขั้นตอนการปั่นไอศกรีม ทำให้ไอศกรีมมีการขึ้นฟูต่ำ โดยการขึ้นฟูของไอศกรีมนั้นจะส่งผลต่ออัตราการละลายของไอศกรีมนมถั่วเหลือง กล่าวคือเมื่อไอศกรีมมีการขึ้นฟูสูงขึ้นอัตราการละลายของไอศกรีมจะลดลง ผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่รายงานว่าไอศกรีมที่มีค่าการขึ้นฟูสูงจะมีอัตราการละลายต่ำ เนื่องจากฟองอากาศที่แทรกในเนื้อไอศกรีมทำหน้าที่คล้ายฉนวนป้องกันความร้อน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไปยังไอศกรีมช้าลง ส่งผลให้ช่วยชะลอการละลายของไอศกรีม (Sofjan & Hartel, 2004; Soukoulis *et al.*, 2008)

Table 4 Physical properties of soymilk ice cream with and without RPF

Physical properties	SMI	SMI-RPF 0.01%	SMI-RPF 0.1%	SMI-RPF 1%
viscosity (cP)	3,028±64 ^c	3,247±74 ^b	3,307±17 ^b	3,759±5 ^a
overrun (%) ^{ns}	88.32±6.67	87.97±5.83	78.39±4.34	72.27±9.55
melting down (g/min)	0.48±0.01 ^c	0.54±0.01 ^b	0.53±0.01 ^b	0.75±0.02 ^a
L* ^{ns}	96.77±0.61	96.65±1.12	97.43±0.69	97.18±0.92
a*	1.76±0.45 ^c	3.01±0.1 ^b	2.82±0.14 ^b	5.14±0.37 ^a
b*	3.13±0.38 ^d	9.87±0.2 ^c	10.72±0.09 ^b	16.57±0.24 ^a
hardness (g)	2,447±194 ^d	3,408±91 ^c	3,970±112 ^b	6,798±92 ^a
adhesiveness (mJ)	3.63±0.59 ^b	4.83±1.91 ^b	6.26±0.54 ^{ab}	8.86±0.88 ^a

Data are presented as means ± standard error.

Data with the different letter superscripts within each row are significantly different ($p \leq 0.05$).

ns means no significant difference between means ($p > 0.05$).

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสีของไอศกรีมแสดงให้เห็นว่าค่าความสว่าง (L^*) ของไอศกรีมทั้งหมดไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 96.65-97.43 ในขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) ที่พบในไอศกรีมทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.76-5.14 และ 3.13-16.57 ตามลำดับ ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสดมีค่าสีแดงและสีเหลืองสูงกว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน เนื้อมะพร้าวสดมีสีเหลืองอมส้มตามธรรมชาติ ดังนั้นปริมาณของเนื้อมะพร้าวสดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสีแดงและสีเหลืองที่พบในไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแหล่งที่มาของรงควัตถุในเนื้อมะพร้าวสดสามารถอธิบายได้จากงานวิจัยของ Ali *et al.*, (2010) ที่กล่าวว่าเนื้อมะพร้าวสดมีแคโรทีนอยด์ประมาณ 26-28 มิลลิกรัม ต่อเนื้อมะพร้าวสด 100 กรัม ทำให้เนื้อมะพร้าวสดมีสีเหลืองจนถึงสีแดง

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสดสามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาณเนื้อมะพร้าวสดส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีความหนืดสูงขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของของแข็งทั้งหมดที่พบในเนื้อมะพร้าวสด ส่งผลให้การตีอากาศเข้าไปแทรกในไอศกรีมระหว่างการปั่น ไอศกรีมเกิดขึ้นได้ยาก ไอศกรีมจึงมีการขึ้นฟูต่ำเพราะฟองอากาศที่แทรกเข้าไปภายในไอศกรีมเหลวมีปริมาณน้อยและไม่คงตัว ซึ่งจะส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองที่ผสมเนื้อมะพร้าวสดมีอัตราการละลายสูงขึ้นซึ่งได้อภิปรายไปแล้วข้างต้น โดยผลที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมอีกด้วย

ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของไอศกรีมพบว่าไอศกรีมทั้งหมดมีค่าความแข็งและความยืดหยุ่นในช่วง 2447-6798 กรัม และ 3.63-8.86 มิลลิจูล ตามลำดับ ความแข็งและความยืดหยุ่นของเนื้อไอศกรีมมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเนื้อมะพร้าวสดเพิ่มขึ้นกล่าวคือเนื้อมะพร้าวสดส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดในไอศกรีมนมถั่วเหลืองเพราะมีการโบไฮเดรต ไบโพรตีน และเถ้า แต่จะส่งผลต่อการลดลงของค่าการขึ้นฟู เนื่องจากความหนืดในไอศกรีมจะขัดขวางการแทรกตัวของอากาศในเนื้อไอศกรีมขณะปั่น ทำให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสดมีความแข็งและความยืดหยุ่นสูงกว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jayasinghe & Ratnasingam (2021) ที่กล่าวว่าเนื้อสัมผัสไอศกรีมที่ผสมเนื้อมะพร้าวสดมีความแข็งและความยืดหยุ่นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไอศกรีมที่ไม่ผสมเนื้อมะพร้าวสด

2. ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อมะพร้าวสด

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Table 5) พบว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองที่ผสมเนื้อมะพร้าวสด ร้อยละ 1 มีกลิ่นลูกตาลสุกมากที่สุด และแตกต่าง กับไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ($p \leq 0.05$) ผลการประเมินด้านสี กลิ่น เหนียว ความหวาน เนื้อสัมผัส และขนาดของผลึกน้ำแข็ง พบว่าผู้ประเมินไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างไอศกรีมทั้ง 4 สูตร ($p > 0.05$)

Table 5 The intensity of attributes found in soymilk ice cream with and without RPF

Attributes	SMI	SMI-RPF 0.01%	SMI-RPF 0.1%	SMI-RPF 1%
colour ^{ns}	25.1±10.8	25.5±10.5	27.2±10.1	52.8±11.2
RPF odour	5.1±1.3 ^b	20.3±16.3 ^{ab}	22.5±15.7 ^{ab}	53.3±17.4 ^a
foul-smelling ^{ns}	17.5±5.9	16.7±5.4	15.5±4.5	12.2±4.3
sweetness ^{ns}	21.8±9.6	21.3±9.7	24.5±9.1	24.7±9.1
texture ^{ns}	24.1±6.2	27.5±7.1	26.2±7.8	37.1±3.87
ice crystal size ^{ns}	30.5±11.5	27.8±9.4	22.5±6.3	18.3±3.9

Data are presented as means ± standard error.

Data with the different letter superscripts within each row are significantly different ($p \leq 0.05$).

ns means no significant difference between means ($p > 0.05$).

แต่ทว่าหากพิจารณาค่าเฉลี่ยแต่ละคุณลักษณะของไอศกรีมแต่ละสูตรจะพบว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐานมีแนวโน้มว่าพบกลิ่นเหม็นเขียวมากกว่าและผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุก โดยสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อผลตาลสุกในไอศกรีมนมถั่วเหลืองจะช่วยเพิ่มระดับความเข้มข้นของกลิ่นผลตาลสุกซึ่งมีแนวโน้มที่จะช่วยกลบกลิ่นเหม็นเขียวจากนมถั่วเหลืองได้ โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Da Silveira Agostini-Costa (2018) ได้กล่าวว่าเนื้อผลตาลสุกมีกลิ่นหอมตามธรรมชาติซึ่งสามารถใช้แต่งกลิ่นอาหารได้ ผลการทดลองใน Table 5 แสดงให้เห็นว่าพบกลิ่นหอมของผลตาลสุกในไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐานในระดับความเข้มข้นต่ำ จากการศึกษาของ Kaneko *et al.*, (2011) ได้ยืนยันว่ามีการพบกลิ่นหอมหวานที่เกิดจาก trans-4,5-epoxy-(E)-2-decenal ในนมถั่วเหลืองธรรมชาติ จึงเป็นไปได้ว่าผู้ประเมินไม่สามารถแยกแยะกลิ่นในกลุ่ม sweet note ที่พบในนมถั่วเหลืองและผลตาลสุกได้ เนื่องจากระดับความเข้มข้นของกลิ่นที่พบในไอศกรีมมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีความหนืดสูงกว่าไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ซึ่งความหนืดที่เกิดขึ้นจะช่วยลดการเคลื่อนที่มารวมตัวกันของผลึกน้ำแข็งและผลึกน้ำตาลที่พบใน serum phase (Goff *et al.*, 2013) แต่อย่างไรก็ตามความหนืดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีความแข็งมากขึ้น การเพิ่มปริมาณเนื้อผลตาลสุกจึงส่งผลให้ไอศกรีมมีความหนืดที่สูงขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการแทรกตัวของอากาศในเนื้อไอศกรีมระหว่างการปั่น (Abdel-Haleem & Awad, 2015) ส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกจึงมีเนื้อสัมผัสที่แน่นขึ้น จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าการใช้เนื้อผลตาลสุกร้อยละ 1 ผสมลงไปในไอศกรีมนมถั่วเหลืองจะช่วยกลบกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์จากถั่วเหลืองได้ สังเกตจากแนวโน้มของกลิ่นเหม็นเขียวลดลงเมื่อเทียบกับไอศกรีมสูตรที่ไม่ผสมเนื้อผลตาลสุก อย่างไรก็ตามการใช้เนื้อผลตาลสุกในไอศกรีมนมถั่วเหลืองไม่ควรใช้มากกว่าร้อยละ 5 เนื่องจากผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary test) ของผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าผู้ประเมินส่วนใหญ่ไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมีกลิ่นผลตาลสุกมากเกินไปจนกลบกลิ่นหอมของนมถั่วเหลือง

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การเพิ่มปริมาณของเนื้อผลตาลสุกส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองผสมเนื้อผลตาลสุกมีการขึ้นฟูต่ำและมีอัตราการ

ละลายสูงขึ้น การวิเคราะห์ค่าสีแสดงให้เห็นว่าเนื้อผลตาลสุกยังช่วยให้ไอศกรีมนมถั่วเหลืองมีค่า a^* และ b^* เพิ่มขึ้น สำหรับการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของไอศกรีมนมถั่วเหลืองพบว่าเนื้อผลตาลสุกส่งผลให้ไอศกรีมมีความแข็งและความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่สอดคล้องกับผลการประเมินทางประสาทสัมผัสเนื่องจากผู้ประเมินไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างเนื้อสัมผัสของไอศกรีมแต่ละสูตรได้ อย่างไรก็ตามผู้ประเมินสามารถแยกแยะความแตกต่างของกลิ่นเนื้อผลตาลสุก โดยไอศกรีมนมถั่วเหลืองที่ผสมเนื้อผลตาลสุกร้อยละ 1 มีกลิ่นของผลตาลสุกมากที่สุดและแตกต่างจากไอศกรีมนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการใช้เนื้อผลตาลสุกร้อยละ 1 ผสมในไอศกรีมนมถั่วเหลือง จะช่วยเพิ่มกลิ่นหอมของผลตาลสุกซึ่งมีแนวโน้มว่าสามารถช่วยกลบกลิ่นเหม็นเขียวที่พบในนมถั่วเหลืองได้

จากการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่าควรเพิ่มขั้นตอนการ homogenisation ในไอศกรีมเหลว เพื่อให้ไขมันจากวิปป์ครีมเกิดการแตกตัวและผสมกับส่วนของเหลวอื่นในไอศกรีมได้มากขึ้น ส่งผลให้ไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งมีเนื้อสัมผัสที่ดีและช่วยลดการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ในไอศกรีมได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

เอกสารอ้างอิง

- จริญญา อับดุลสลาม และกิตติชัย บรรจง. (2560). ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสกัดเพคตินจากลูกตาล สุกด้วยน้ำโดยไม่ปรับพีเอช. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 9, 24-34.
- จารุวรรณ สุนทรเสณี. (2555). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกะทิเนื้อตาลสุก. มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ ฌริฎฒา รอดขวัญ. (2565). ผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืช. วารสารวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 52, 5-13.
- สุจิตา กิจจาวรเสถียร. (2565). การพัฒนาสูตรแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุก. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, 16(2), 1-12.
- แสงแข สพันธุ์พงศ์. (2562). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อตาลสุกหยาบ. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี, 8, 292-302.

- Abdel-Haleem, A. M., & Awad, R. (2015). Some quality attributes of low fat ice cream substituted with hullless barley flour and barley β -glucan. *Journal of Food Science and technology*, 52(10), 6425-6434.
- Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K., & Herald, T. (2000). Rheological properties of ice cream mixes and frozen ice creams containing fat and fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 83(10), 2224-2229.
- Ahanian, B., Pourahmad, R., & Mirahmadi, F. (2014). Effect of substituting soy milk instead of skim milk on physicochemical and sensory properties of sesame ice cream. *Advances in Environmental Biology*, 8(11), 9-16.
- Akbari, M., Eskandari, M. H., & Davoudi, Z. (2019). Application and functions of fat replacers in low-fat ice cream: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 34-40.
- Ali, A., Alhadji, D., Tchiegang, C., & Saïdou, C. (2010). Physico-chemical properties of palmyra palm (*Borassus aethiopum* Mart.) fruits from Northern Cameroon. *African Journal of Food Science*, 4(3), 115-119.
- AOAC. (2000). *Official method of Analysis of AOAC*. (17th ed.) . Association of Official Analytical Chemists Inc.
- Aydar, E. F., Tutuncu, S., & Ozcelik, B. (2020). Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects. *Journal of Functional Foods*, 70, 103975.
- Beegum, P. S., Nair, J. P., Manikantan, M., Pandiselvam, R., Shill, S., Neenu, S., & Hebbar, K. (2021). Effect of coconut milk, tender coconut and coconut sugar on the physico-chemical and sensory attributes in ice cream. *Journal of Food Science and Technology*, 1-12.
- Behera, S., & Nayak, B. (2022). Phytochemical constituents and nutritional potential of palmyra palm: A review. *An International Multidisciplinary Online Journal*, 2(12), 1-8.
- Bisla, G., Archana, P. V., & Sharma, S. (2012). Development of ice creams from Soybean milk & Watermelon seeds milk and Evaluation of their acceptability and Nourishing potential. *Advances in Applied Science Research*, 3(1), 371-6.
- Da Silveira Agostini-Costa, T. (2018). Bioactive compounds and health benefits of some palm species traditionally used in Africa and the Americas - a review. *Journal of Ethnopharmacology*, 224, 202-229.
- Daw, E., & Hartel, R. (2015). Fat destabilization and melt-down of ice creams with increased protein content. *International Dairy Journal*, 43, 33-41.
- Ghaderi, S., Mazaheri Tehrani, M., & Herarinejad, M. A. (2021). Qualitative analysis of the structural, thermal and rheological properties of a plant ice cream based on soy and sesame milks. *Food Science & Nutrition*, 9(1), 1289-1298.
- Goff, H. D., Hartel, R. W., Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2013). Ice cream structure. *Ice cream*, 313-352.
- Jayasinghe, M., & Ratnasingam, P. (2021). Sensory variation analysis in ice cream made by Palmyra (*Borassus Flabellifer*) Pulp with jaggery and selected spices. *Agricultural Sciences Journal*, 3(2), 35-50.
- Kaneko, S., Kumazawa, K., & Nishimura, O. (2011). Studies on the key aroma compounds in soy milk made from three different soybean cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(22), 12204-12209.
- Kaya, S., & Tekin, A. R. (2001). The effect of salep content on the rheological characteristics of a typical ice-cream mix. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 59-62.
- Krishnaveni, T., Arunachalam, R., Chandrakumar, M., Parthasarathi, G., & Nisha, R. (2020). Potential review on Palmyra (*Borassus Flabellifer* L.). *Advances in Research*, 21(9), 29-40.
- Kurultay, Ş., Öksüz, Ö., & Gokcebag, Ö. (2010). The influence of different total solid, stabilizer and overrun levels in industrial ice cream production using coconut oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(s1), 346-354.
- Peres, J., Esmerino, E., Da Silva, A. L., Racowski, I., & Bolini, H. (2018). Sensory profile, drivers of liking, and influence of information on the acceptance of low-calorie synbiotic and probiotic chocolate ice cream. *Journal of Food Science*, 83(3), 1350-1359.

- Sofjan, R. P., & Hartel, R. W. (2004). Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *International Dairy Journal*, 14, 255-262.
- Soukoulis, C., Chandrinos, I., & Tzia, C. (2008). Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with K-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1816-1827.
- Syed, Q. A., Anwar, S., Shukat, R., & Zahoor, T. (2018). Effects of different ingredients on texture of ice cream. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(6), 422-435.
- Szkolnicka, K., Dmytrów, I., & Mituniewicz-Malek, A. (2020). Buttermilk ice cream - New method for buttermilk utilization. *Food Science & Nutrition*, 8(3), 1461-1470.
- Thevamirtha, C., Balassubramaniam, A., Srithayalan, S., & Selvakumar, P. M. (2023). An Insight into the antioxidant activity of the facial cream, solid soap and liquid soap made using the carotenoid extract of palmyrah (*Borassus flabellifer*) fruit pulp. *Industrial Crops and Products*, 195, 116413.
- Vengaiah, P.C., Vijaya kumara, B., Murthy, G.N., & Prasad, K.R. (2015). Physico-Chemical Properties of Palmyrah fruit Pulp (*Borassus flabellifer* L). *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 5(5), 1000391.

ความหลากหลายทางสัณฐานวิทยาของกระท่อม (*Mitragyna speciosa* (Korth) Havil) ระดับประชากรในภาคใต้ของประเทศไทย

Morphological diversity of Kratom (*Mitragyna speciosa* (Korth) Havil) at population level in Southern Thailand

วิโรจน์ เชาว์วิเศษ¹, ศุภฤกษ์ สุขสมาน² และ เกษร เมืองทิพย์^{1*}

Wirot Chaowiset¹, Suparerk Sooksmarn² and Kesorn Muangtip^{1*}

Received: 19 September 2023 ; Revised: 16 October 2023 ; Accepted: 7 November 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายของประชากรย่อยของกระท่อมในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการจำแนก ทำการศึกษาตัวอย่างต้นกระท่อมในพื้นที่ 9 จังหวัด ได้แก่ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ตรัง พัทลุง กระบี่ พังงา ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ และระนอง บันทึกวิถีถิ่นที่อยู่ และลักษณะสัณฐานวิทยาต่าง ๆ วิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ลักษณะสัณฐานวิทยาของใบด้วยเทคนิค UPGMA พบว่าสามารถจำแนกกระท่อมออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มกระท่อมก้านเขียว มีสีก้านใบประกอบด้วย สีเขียว เขียวอมเหลือง และเหลืองอมเขียว และกลุ่มกระท่อมก้านแดง มีสีก้านใบประกอบด้วย สีแดง แดงอมส้ม และส้มอมชมพู ลักษณะรูปร่างใบจำแนกได้ 3 แบบ คือ ใบรูปหอก (lanceolate) ใบรูปไข่ (ovate) และใบรูปไข่กลับ (obovate) ลักษณะโคนใบ (leaf base) จำแนกได้ 3 แบบ คือ โคนใบแหลมรูปลิ้ม (cuneate) โคนใบมน (obtusate) และโคนใบเว้ารูปหัวใจ (cordate) ลักษณะปลายใบ (leaf apex) จำแนกได้ 2 แบบ คือ ปลายใบเรียวแหลม (acuminate) และปลายใบปลายเป็นติ่งแหลม (cuspidate) ลักษณะขอบใบ จำแนกได้ 2 กลุ่ม คือ ขอบใบเรียบ (entire) และขอบใบหยักซี่ฟัน (dentate) ลักษณะสีหุบใบ (stipule color) จำแนกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มสีเขียวและสีเขียวอมเหลือง กลุ่มสีชมพูอมส้มและสีส้มอมชมพู และกลุ่มสีแดงอมส้มและสีแดง ดังนั้น จึงบ่งชี้ได้ว่าพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยมีความหลากหลายของประชากรย่อยของกระท่อม โดยมีความแตกต่างของลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ชัดเจน

คำสำคัญ: ความหลากหลาย, กระท่อม, สัณฐานวิทยา, ภาคใต้ของประเทศไทย

Abstract

The objective of this research was to study the diversity of kratom subpopulation in the Southern Thailand using morphological characteristics for classification. Study on kratom specimens in 9 provinces in the area of Southern Thailand: Surat Thani, Nakhon Si Thammarat, Trang, Phatthalung, Krabi, Phang Nga, Chumphon, Prachuap Khiri Khan and Ranong. Record of ecosystem and morphological characteristics. Data were analyzed and a dendrogram using the UPGMA technique. It was found that kratom can be divided into 2 large groups: 1) Group of green petiole includes green, yellow-green and green-yellow colors 2) group of red petiole includes red, red-orange, pink-orange colors. Leaf shape can be classified into 3 types: lanceolate, obvate and obovate. Leaf base can be classified into 3 types: cuneate, obtusate and cordate. Leaf apex can be classified into 2 types: acuminate and cuspidate. Leaf margin can be classified into 2 types: entire and dentate. Stipule color can be classified into 3 groups: green and yellow-green group, orange-pink and pink-orange group and red-orange and red group. Therefore, it can be indicated that the Southern Thailand has a wide variety of kratom population with morphological differences.

Keywords: Diversity, Kratom, morphology, Southern Thailand

¹ สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จ.สุราษฎร์ธานี 84100

² ภาควิชาการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

¹ Program in Plant Science, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Suratthani 84100

² Department of Management, Faculty of Business Administration, Kasetsart University, Bangkok 10900

* Corresponding author: Email: kesorn.mua@sru.ac.th

บทนำ

กระท่อม (*Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil.) เป็นพืชที่คนไทยใช้ประโยชน์มาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งพบตำรับยาที่มีกระท่อมเป็นส่วนประกอบในคัมภีร์ตำราการแพทย์แผนไทยดั้งเดิม 7 ตำรับ และพบว่าหมอพื้นบ้านในภาคใต้ของประเทศไทยยังใช้ประโยชน์จากกระท่อมเพื่อการรักษาโรคทั้งในแบบยาเดี่ยวและยาคำรับ (ชนัน นาคะพันธ์, 2559) ในกระท่อมมีสารสำคัญที่อยู่ในกลุ่มอัลคาลอยด์ ได้แก่ ไมทราไจนีน (mitragynine) และเซเวนไฮดรอกซีไมทราไจนีน (7-hydroxymitragynine) (Houghton *et al.*, 1991) ซึ่งสามารถนำไปกระท่อมมาใช้รักษาการท้องเสียรักษาแผลในกระเพาะอาหาร (Asanakornchai *et al.*, 2015) ลดเบาหวาน ความอยากอาหาร (Meepong and Sooksawate, 2019) อีกทั้งยังมีฤทธิ์ลดอาการทางจิตเวช เช่นภาวะความแปรปรวนทางอารมณ์ หรืออาการซึมเศร้าโดยผ่านการจับกับกับตัวรับชนิด serotonin production (Kumarnsit, 2006) บรรเทาอาการไอ คลายความเครียด ลดการคลายตัวของกล้ามเนื้อ ใช้รักษาอาการอื่น ๆ ผลการวิจัยของ Hemby *et al.*, (2019) บ่งชี้ว่าไมทราไจนีนสามารถลดการใช้มอร์ฟีนซึ่งเป็นลักษณะของเภสัชบำบัดสำหรับผู้ติดยาเสพติดได้อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในประเทศไทยมีการใช้กระท่อมมาอย่างยาวนาน แต่การจำแนกสายพันธุ์ของกระท่อมยังไม่มีความชัดเจน อาจเป็นเพียงการเรียกชื่อตามคนในท้องถิ่นนั้น ๆ อาจเนื่องมาจากก่อนหน้านี้กระท่อมถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของยาเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 และถูกปลดออกจากบัญชียาเสพติดเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2564 จากนั้นได้มีการออกพระราชบัญญัติกระท่อม พ.ศ. 2565 เพื่อกำกับดูแลการใช้ประโยชน์และการค้าเป็นการเฉพาะ การรายงานข้อมูลของความหลากหลายของประชากรกระท่อมก่อนหน้านี้จึงยังพบจำนวนน้อยมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งถือว่ามียากระท่อมกระจายอยู่ทั่วไปมากที่สุด การวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลที่จะช่วยบ่งชี้ถึงความหลากหลายของประชากรตามการจำแนกด้วยลักษณะสัณฐานวิทยาได้อย่างชัดเจนและสามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อคัดเลือกต้นกระท่อมที่มีลักษณะเด่นต่อขยายพันธุ์เพื่อการค้าและการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านการแพทย์ทางเลือก การแพทย์สมัยใหม่ เวชสำอาง หรือการใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทราบถึงความหลากหลายของประชากรย่อยของกระท่อมในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการจำแนก

วิธีดำเนินการวิจัย

ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และพื้นที่ศึกษา

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างในการให้ข้อมูลเพื่อศึกษาค้างนี้ ได้แก่ ปราชญ์ชาวบ้านหรือผู้นำชุมชนที่มีความรู้เรื่องกระท่อมมาอย่างยาวนาน และศึกษาต้นกระท่อมโดยดูจากลักษณะที่โดดเด่นของต้นกระท่อมจากคำแนะนำของผู้นำชุมชนหรือปราชญ์ชาวบ้านและต้นที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ประโยชน์ บันทึกลักษณะวิสัยถิ่นที่อยู่อาศัย พิกัดที่ตั้ง ความสูงจากระดับน้ำทะเล อายุต้น ความสูงต้น ขนาดเส้นรอบวงต้น ขนาดทรงพุ่ม วิธีการขยายพันธุ์ พื้นที่สำรวจและศึกษาประกอบด้วย 9 จังหวัดในภาคใต้ของประเทศไทย รวม 20 ตำบล (Figure 1) ประกอบด้วย อ.บ้านนาสาร จ.สุราษฎร์ธานี 10 ตำบล ได้แก่ ต.พรุพี (PP) ต.ท่าชี (TC) ต.เพิ่มพูนทรัพย์ (PPS) ต.นาสาร (NS) ต.ทุ่งเตา (TT) ต.ทุ่งเตาใหม่ (TTM) ต.ควนสุบรรณ (KSB) ต.ลำพูน (LP) ต.คลองปราบ (KP) ต.ควนศรี (KS) รวม 167 ต้น ต.คลองเส (KSE) อ.ฉำพระภูมิ จ.นครศรีธรรมราช จำนวน 9 ต้น ต.นาพละ (NP) อ.เมือง จ.ตรัง จำนวน 9 ต้น ต.ลำสินธุ์ (LS) อ.ศรีนครินทร์ จ.พัทลุง จำนวน 10 ต้น ต.เขาดิน (KD) อ.พนม จ.กระบี่ จำนวน 25 ต้น ต.ลำภี (LPE) อ.ท้ายเหมือง จ.พังงา จำนวน 18 ต้น ต.บางหมาก (BM) อ.เมือง ต.ทะเลทรัพย์ (TLS) อ.ปะทิว ต.ทรัพย์อนันต์ (SAN) อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร รวม 10 ต้น ต.ช้างแรก (CR) อ.บางสะพานน้อย จ.ประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 8 ต้น ต.ละอุ่นเหนือ (LAN) อ.ละอุ่น จ.ระนอง จำนวน 8 ต้น รวมตัวอย่างต้นกระท่อมที่ศึกษาทั้งหมด 268 ต้น

บันทึกภาพถ่ายของต้น ใบ ดอก และผล บันทึกข้อมูลลักษณะของใบที่สมบูรณ์ในตำแหน่งคู่ที่ 3-4 ได้แก่ รูปร่างใบ ลักษณะโคนใบ ลักษณะปลายใบ ลักษณะขอบใบ ส่วนสีก้านใบและสีหุบใบสังเกตตั้งแต่ใบคู่ที่ 1-5 ตามคู่มือการจำแนกพรรณไม้ของสำนักงานหอพรรณไม้ (2559) และทำการจัดเก็บตัวอย่างพรรณไม้แห้งไว้ที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

จัดทำแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของต้นกระท่อมที่สำรวจโดยใช้ลักษณะสัณฐานวิทยาของใบ 6 ลักษณะหลัก ได้แก่ รูปร่างใบ โคนใบ ปลายใบ ขอบใบ สีหุบใบ และสีก้านใบ โดยในแต่ละพื้นที่จะเลือกต้นที่มีลักษณะเหมือนกันเพียง 1 ตัวอย่างเพื่อใช้เป็นตัวแทนสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ (dendrogram) ด้วยเทคนิค unweighted pair group method of arithmetic average (UPGMA) (Sneath & Sokal, 1973) โดยใช้โปรแกรม NTSYS-pc version 2.20 (Rohlf, 1997)

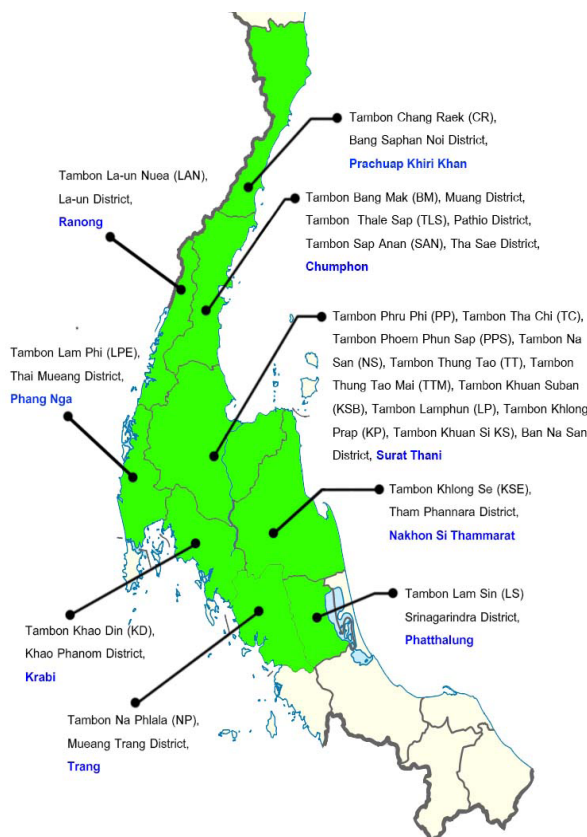


Figure 1 Research areas of kratom specimens in Southern Thailand

ผลการวิจัย

ลักษณะต้นกระท่อมที่ศึกษาในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยมีความหลากหลายของวิสัยถิ่นที่อยู่ โดยมีความสูงจากระดับน้ำทะเลอยู่ในช่วง 2.00-137.87 เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.56 เมตร อายุของต้น 0.5-100.0 ปี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.3 ปี ขนาดเส้นรอบวงต้น 6.0-200.0 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57.3 เซนติเมตร ความสูงต้น 1.2-39.2 เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.5 เมตร และความกว้างทรงพุ่ม 0.8-11.8 เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.2 เมตร (Table 1) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (r -square; r^2) ของความสูงจากระดับน้ำทะเล อายุของต้น ขนาดเส้น รอบวงต้น ความสูงต้น และความกว้างทรงพุ่มของกระท่อมมีค่าที่น้อยมาก (0.0002-0.0363) แสดงถึงความสอดคล้อง (regression) ว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลต้นกระท่อมที่หลากหลายจากจำนวนต้นกระท่อมที่

ศึกษาทั้งหมด 268 ต้น นอกจากนี้ พบวิธีการขยายพันธุ์ของกระท่อม 3 วิธี คือ การเพาะด้วยเมล็ด (135 ต้น) การเสียบยอด (96 ต้น) และการตอนกิ่ง (37 ต้น) (Figure 2A-F)

Table 1 Growth characteristics of 268 kratom plants in Southern Thailand

Growth characteristics	Max.	Min.	Average
Altitude above sea level	137.87 (m)	2.0 (m)	44.56 (m)
Age of kratom tree	100.0 (y)	0.5 (y)	13.3 (y)
Circumference	200.0 (cm)	6.0 (cm)	57.3 (cm)
Height of kratom tree	39.2 (m)	1.2 (m)	9.5 (m)
Canopy width	11.8 (m)	0.8 (m)	5.2 (m)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระท่อมโดยทั่วไปจะเป็นไม้ยืนต้น (tree) ขนาดใหญ่ มีลำต้นตรงและสามารถมีความสูงได้มากกว่า 30 เมตร มีอายุยืนหลายปี มีใบเป็นแบบใบเดี่ยว (simple leaf) มีหูใบ (stipule) ขนาดใหญ่ 2 แผ่น ประกบกันลักษณะเป็นกาบหุ้มยอด และเมื่อทำการจำแนกสายพันธุ์กระท่อมตามลักษณะสัณฐานวิทยาที่ปรากฏ (phenotype) ของตัวอย่างกระท่อมสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กระท่อมก้านเขียวและกระท่อมก้านแดง โดยดูจากสีที่ปรากฏบนก้านใบและเส้นกลางใบเป็นหลักและแบ่งกลุ่มย่อยตามลักษณะรูปร่างของใบและการเรียกชื่อของคนในท้องถิ่น ได้แก่ แดงกวาง ใบโพธิ์ หางกิ้ง แมงดา ยักษ์ใหญ่ ใบยาง เป็นต้น

จำนวนต้นกระท่อมแยกตามลักษณะที่ศึกษาจากจำนวนต้นทั้งหมด 268 ต้น พบว่า มีจำนวนต้นในกลุ่มของก้านเขียวแดงกวาง (KKTK) มากที่สุด (161 ต้น คิดเป็น 60.07 เปอร์เซ็นต์) ลักษณะรูปร่างใบ พบรูปร่างใบรูปหอก (lanceolate) มากที่สุด (140 ต้น คิดเป็น 52.24 เปอร์เซ็นต์) ลักษณะโคนใบพบลักษณะแบบแหลมรูปลิ้ม (cuneate) มากที่สุด (106 ต้น คิดเป็น 39.55 เปอร์เซ็นต์) ลักษณะปลายใบพบลักษณะแบบเรียวแหลม (acuminate) มากที่สุด (160 ต้น คิดเป็น 59.70 เปอร์เซ็นต์) ลักษณะสีหูใบพบกลุ่มสีเขียวหรือสีเขียวอมเหลือง มากที่สุด (156 ต้น คิดเป็น 58.21 เปอร์เซ็นต์) (Table 2)

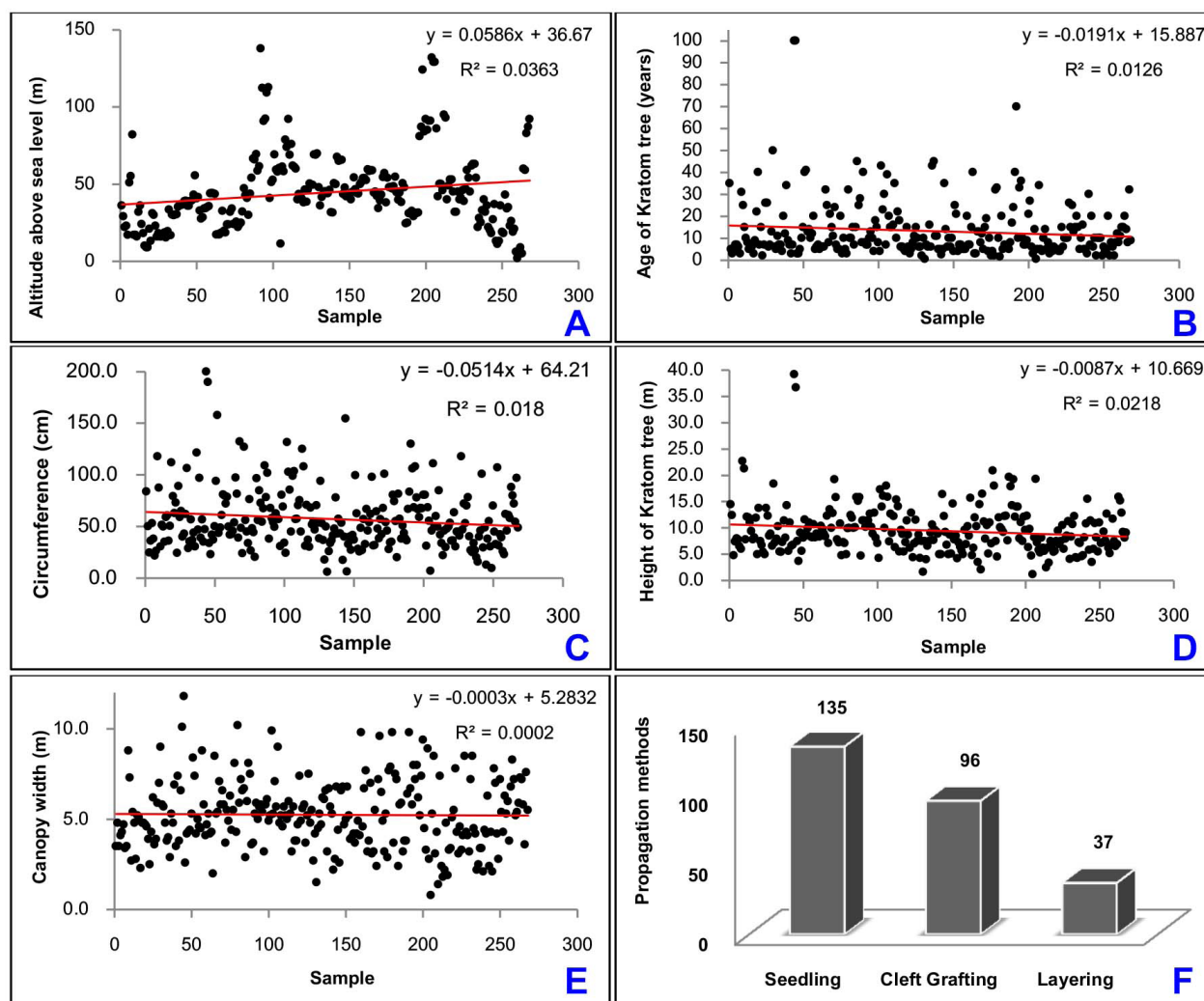


Figure 2 Altitude above sea level (A), age (B), circumference (C) height (D), canopy width (E) and propagation method (F) of 268 kratom plants studied in Southern Thailand

Table 2 Number of kratom plants separated according to characteristics from total of 268 plants

Characteristics	Sub-characteristics	Amount	Percentage
Name according to appearance	KKTK group	161	60.07
	KKBP group	39	14.55
	KKHK group	18	6.72
	KDTK group	34	12.69
	KDBP group	3	1.12
	KDHK group	13	4.85
Leaf shape	Lanceolate	140	52.24
	Ovate	59	22.01
	Obovate	69	25.75
Leaf base	Cuneate	106	39.55
	Obtuse	99	36.94
	Cordate	63	23.51

Table 2 Number of kratom plants separated according to characteristics from total of 268 plants (Continue)

Characteristics	Sub-characteristics	Amount	Percentage
Leaf apex	Acuminate	160	59.70
	Cuspidate	108	40.30
Leaf margin	Entire	237	88.40
	Dentate	31	11.57
Stipule color	Green/Yellow-Green	156	58.21
	Pink-Orange/Orange- Pink	34	12.69
	Red/Orange-Red	78	29.10

การจำแนกฐานวิธานวิทยาตามสีของก้านใบ (petiole color) และรูปร่างใบ (leaf shape) ของกระท่อม สามารถจำแนกสีของก้านใบออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1) กลุ่มกระท่อมก้านเขียว สีก้านใบประกอบด้วย สีเขียว เขียวอมเหลือง และเหลืองอมเขียว 2) กลุ่มกระท่อมก้านแดง สีก้านใบประกอบด้วย สีแดง แดงอมส้ม และส้มอมชมพู และเมื่อจำแนกด้วยสีของก้านใบ (petiole color) ร่วมกับรูปร่างใบ (leaf shape) สามารถจำแนกกระท่อมได้ออกเป็น 6 กลุ่ม ดังนี้ 1) กระท่อมก้านเขียวแดงกว่า (KKTK) ใบสีเขียวเข้ม มีรูปร่างใบแคบรูปหอก (lanceolate) โคนใบมีลักษณะแหลมรูปลิ้ม (cuneate) หรือแบบมน (obtusate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีเขียวอมเหลืองทั้งหมดหรือมีสีชมพูอมส้มอ่อน ๆ ของใบคู่ที่ 1-3 จากยอด หูใบ (stipule) มีสีเขียว เขียวอมเหลือง หรือเขียวอมชมพูเรื่อ ๆ (Figure 3A) 2) กระท่อมก้านเขียวใบโพธิ์/โพธิ์เขียว/โพธิ์ทอง/ใบยาง (KKBP) ใบสีเขียวเข้มหรือเขียวอ่อน มีรูปร่างใบกว้างรูปไข่ (ovate) หรือใบกว้างค่อนข้างไปทางปลายใบรูปไข่กลับ (obovate) ลักษณะใบมีความหนาคล้ายใบโพธิ์หรือใบยางนา โคนใบมีลักษณะเว้าเป็นรูปหัวใจ (cordate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีเขียวอมเหลืองทั้งหมดหรือมีสีชมพูอมส้มของใบคู่ที่ 1-3 จากยอด หูใบ (stipule) มีสีเขียว เขียวอมเหลือง หรือเขียวอมชมพูเรื่อ ๆ (Figure 3B) 3) กระท่อมก้านเขียวหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่ (KKHK) ใบสีเขียวเข้ม มีรูปร่างใบรูปไข่ (ovate) หรือใบกว้างค่อนข้างไปทางปลายใบรูปไข่กลับ (obovate) โคนใบมีลักษณะเว้าเป็นรูปหัวใจ (cordate) หรือแบบมน (obtusate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีเขียวอมเหลืองทั้งหมด

หรือมีสีชมพูอมส้มอ่อน ๆ ของใบคู่ที่ 1-3 จากยอด ขอบใบส่วนปลายมีลักษณะเป็นหยักแบบซี่ฟัน (dentate) ทั้งสองข้าง พบลักษณะหยักได้ตั้งแต่ 1-5 คู่ แต่ลักษณะการเกิดรอยหยักไม่ได้พบทุกใบทั้งต้น หูใบ (stipule) มีสีเขียว เขียวอมเหลือง หรือเขียวอมชมพูเรื่อ ๆ (Figure 3C) 4) กระท่อมก้านแดงแดงกว่า (KDTK) ใบสีเขียวเข้ม มีรูปร่างใบแคบรูปหอก (lanceolate) โคนใบมีลักษณะแหลมรูปลิ้ม (cuneate) หรือแบบมน (obtusate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีส้มอมชมพู แดงอมส้ม หรือสีแดงทั้งหมด มากกว่า 3 คู่ใบจากส่วนยอด หูใบ (stipule) มีสีชมพูอมส้ม แดงอมชมพู หรือแดงทั้งหมด (Figure 4A) 5) กระท่อมก้านแดงใบโพธิ์ (KDBP) ใบสีเขียวเข้มหรือเขียวอ่อน มีใบรูปไข่ (ovate) หรือรูปไข่กลับ (obovate) ลักษณะคล้ายใบโพธิ์ โคนใบมีลักษณะเว้าเป็นรูปหัวใจ (cordate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีส้มอมชมพู แดงอมส้ม หรือสีแดงทั้งหมด มากกว่า 3 คู่ใบจากส่วนยอด หูใบ (stipule) มีสีชมพูอมส้ม แดงอมชมพู หรือแดงทั้งหมด (Figure 4B) 6) กระท่อมก้านแดงหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่/เก้ายอด (KDHK) ใบสีเขียวเข้ม มีใบรูปไข่ (ovate) หรือรูปไข่กลับ (obovate) โคนใบมีลักษณะเว้าเป็นรูปหัวใจ (cordate) หรือแบบมน (obtusate) ก้านใบและเส้นกลางใบมีสีส้มอมชมพู แดงอมส้ม หรือสีแดงทั้งหมด มากกว่า 3 คู่ใบจากส่วนยอด ขอบใบส่วนปลายใบมีลักษณะเป็นหยักซี่ฟัน (dentate) ทั้งสองข้าง พบลักษณะหยักได้ตั้งแต่ 1-8 คู่ แต่ลักษณะการเกิดรอยหยักไม่ได้พบทุกใบทั้งต้น ส่วนหูใบ (stipule) มีสีชมพูอมส้ม แดงอมชมพู หรือแดงทั้งหมด (Figure 4C)

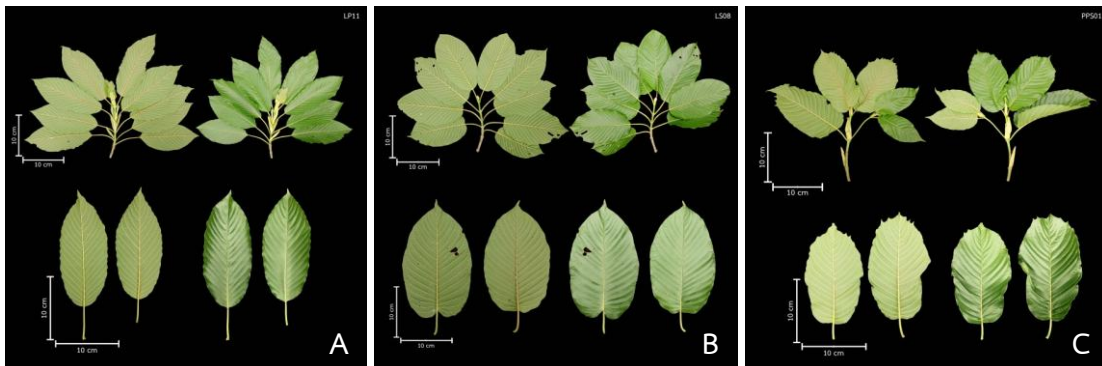


Figure 3 Samples of green petiole (Kan Khiao) group; KTK (A), KBP (B) and KHK (C)

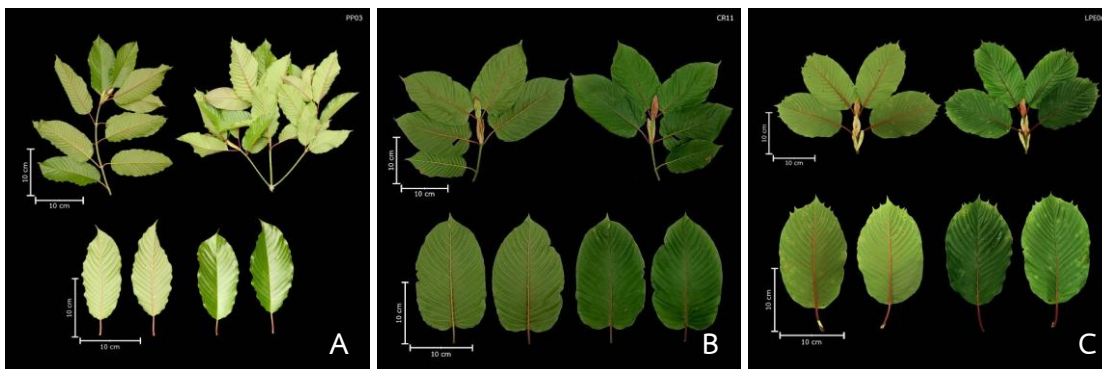


Figure 4 Samples of red petiole (Kan Daeng) group; KDK (A), KDBP (B) and KDKH (C)

การจำแนกลักษณะพื้นฐานวิทยาของกระต่อมจากรูปร่างใบ (leaf shape) สามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบ คือ 1) ใบรูปหอก (lanceolate) มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างใบประมาณ 2.30-2.60 เท่า (Figure 5A) 2) ใบรูปไข่ (ovate) มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างใบประมาณ 1.85-2.25 เท่า (Figure 5B) 3) ใบรูปไข่กลับ (obovate) มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างใบประมาณ 1.98-2.23 เท่า (Figure 5C)

การจำแนกลักษณะพื้นฐานวิทยาของกระต่อมจากลักษณะโคนใบ (leaf base) สามารถจำแนกได้ 3 แบบ คือ 1) โคนใบแหลมรูปปลี (cuneate) (Figure 6A) 2) โคนใบมน (obtusate) (Figure 6B) 3) โคนใบเว้ารูปหัวใจ (cordate) (Figure 6C) การจำแนกลักษณะพื้นฐานวิทยาของกระต่อมจากลักษณะปลายใบ (leaf apex) สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ 1) ปลายใบเรียวแหลม (acuminate) (Figure 7A) 2) และปลายใบปลายเป็นติ่งแหลม (cuspidate) (Figure 7B)

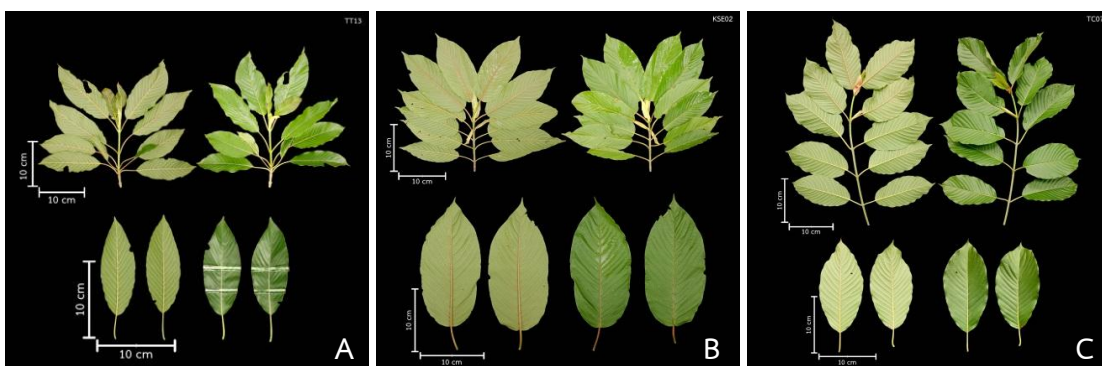


Figure 5 Leaf shape of kratom; lanceolate (A), ovate (B) and obovate (C)

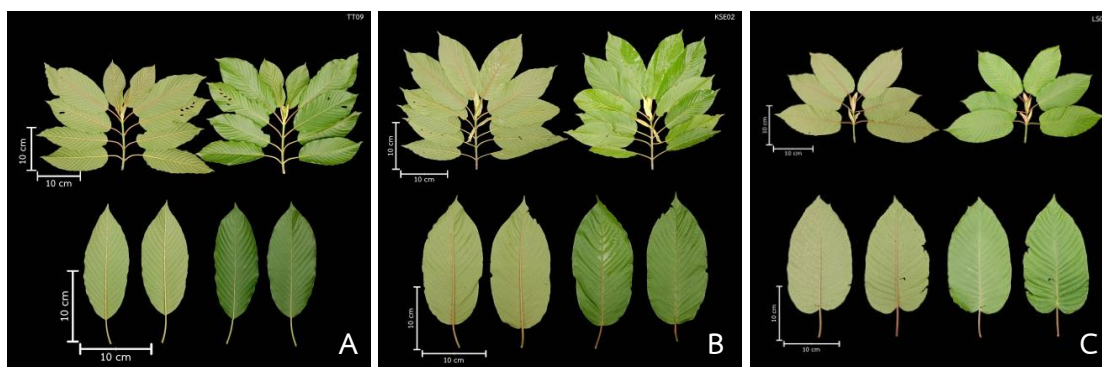


Figure 6 Leaf base of kratom; cuneate (A), obtuse (B), cordate (C)

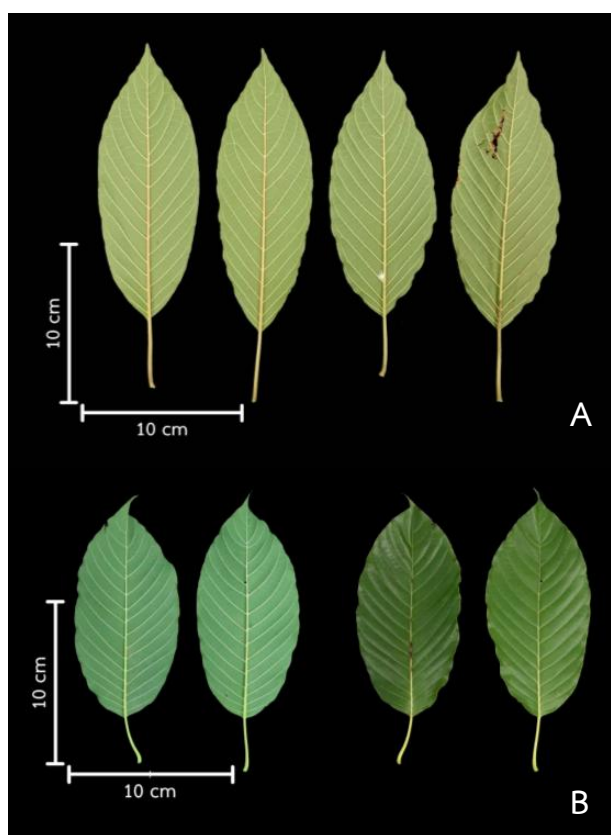


Figure 7 Leaf apex of kratom; acuminate (A) and cuspidate (B)

การจำแนกลักษณะสัณฐานวิทยาจากลักษณะขอบใบ (leaf margin) ของกระท่อม สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ 1) ขอบใบเรียบ (entire) (Figure 8A) 2) ขอบใบเป็นหยักซี่ฟัน (dentate) (Figure 8B)

การจำแนกลักษณะสัณฐานวิทยาของกระท่อม จากลักษณะสีหูใบ (stipule color) สามารถจำแนกได้ 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มสีเขียวและสีเขียวอมเหลือง (Figure 9A) 2) กลุ่มสีชมพูอมส้มและสีส้มอมชมพู (Figure 9B) 3) กลุ่มสีแดงอมส้มและสีแดง (Figure 9C)

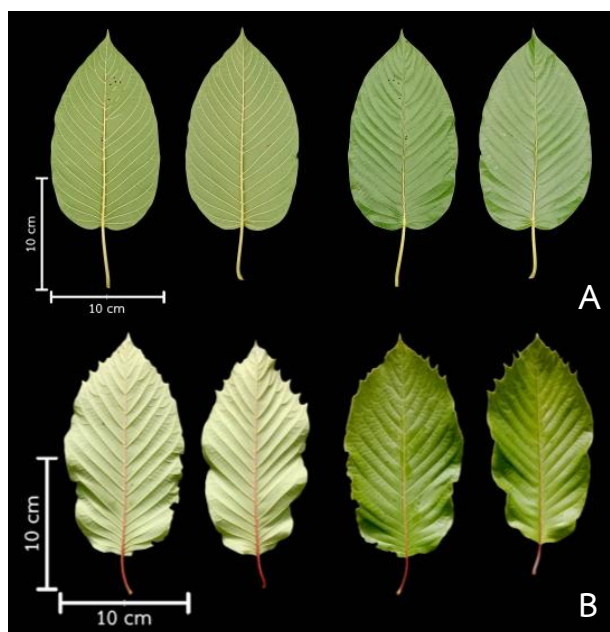


Figure 8 Leaf margin of kratom; entire (A) and dentate (B)

ลักษณะสัณฐานวิทยาของดอก (flower) กระท่อม จะมีดอกเป็นแบบช่อ ดอกกระจุกแน่น ดอกกระท่อมมีทั้งดอกสมบูรณ์เพศ (perfect flower) คือมีทั้งเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน และดอกไม่สมบูรณ์เพศ (imperfect flower) ที่มีแต่เกสรตัวเมีย ช่อดอกมีรูปร่างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 เซนติเมตร ช่อดอกจะออกตามปลายกิ่งแขนง หลังจากที่ได้ดอกได้รับการผสมเกสรและพัฒนาเป็นผล และผลเริ่มแก่กิ่งแขนงเหล่านั้นจะเริ่มเหี่ยวแห้งเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และกิ่งตายในที่สุด สีของช่อดอกกระท่อมสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ โคนดอกย่อยสีเหลืองอ่อน (Figure 10A) และสีส้มอมชมพู (Figure 10B)

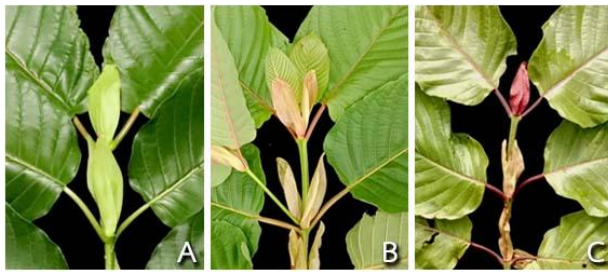


Figure 9 Stipule color of kratom; green/yellow-green color group (A), orange-pink/pink-orange color group (B), orange-red/red color group (C)



Figure 10 Inflorescence color of kratom; light yellow color (A), orange-pink color (B)

ระยะการพัฒนาของดอกจากดอกตูมไปถึงระยะผลแก่ เริ่มจากดอกตูมเกิดที่ปลายยอดมีรูปร่างกลมสีเขียวอมเหลือง มีกาบหุ้มยอด 2 ใบห่อหุ้มอยู่ ทำให้มีลักษณะเหมือนดอกบัวตูม (Figure 11A) เมื่อกาบหุ้มยอดหลุดจะเห็นช่อดอกกลมสีเขียวคล้ายลูกบอลผิวขรุขระ (Figure 11B) ขนาดดอกจะเริ่มใหญ่ขึ้นพร้อมกับการพัฒนาของกลีบดอกสีเขียวที่หนา

แหลมมนขึ้นมาถึงระยะน้อยรอบช่อดอก (Figure 11C) กลีบดอกจะเริ่มแหลม (ปลายมน) และยาวมากขึ้นและเปลี่ยนสีจากเขียวอ่อนเป็นสีขาวอมเหลือง ขาวอมชมพู หรือสีขาว (Figure 11D) หลังจากนั้นเมื่อดอกบานปลายกลีบเปิดออกจะเห็นก้านชูเกสรตัวเมียอยู่ด้านบนสุดรูปร่างเหมือนดอกเห็ดตูมโดยมีอับละอองเกสรตัวผู้สีน้ำตาลแทงออกมาด้านข้างของดอกย่อย ดอกจะบานเต็มที่ประมาณ 3 สัปดาห์และจะมีหลายโทนสี เช่น สีเหลืองอ่อน สีเหลือง และสีเหลืองเข้ม (Figure 11E-F) เมื่อเกสรตัวผู้และตัวเมียผสมกันแล้วก็จะเริ่มพัฒนาเป็นผลโดยกลีบดอกเริ่มลอกออกและร่วงลง (Figure 11G) รังไข่ของแต่ละช่อดอกย่อยจะเริ่มขยายขนาดมีลักษณะอ้วนเรียวเป็นกระเปาะคล้ายผลโกโก้มีสีเขียวอมเหลืองมีรูตรงปลายผลย่อย (Figure 11H) ผลจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นสีน้ำตาลและน้ำตาลเข้มเมื่อสุกแก่เต็มที่ (Figure 11I-J) ผลย่อยที่แก่เต็มที่แตกออกขณะอยู่บนต้น (Figure 11K) ภายในแต่ละผลย่อยจะประกอบด้วยเมล็ดเล็ก ๆ หลายร้อยเมล็ด ลักษณะเมล็ดมีรูปร่างแบนเรียวยาว ขนาดความกว้างประมาณ 0.4-0.6 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 3.0-5.0 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้เมล็ดของกระท่อมสามารถลอยปลิวไปในอากาศได้ไกลเนื่องจากมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (Figure 11L)

เมื่อนำเอาลักษณะพื้นฐานวิทยามาวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ (dendrogram) ด้วยเทคนิค UPGMA โดยค่าสัมประสิทธิ์ความคล้ายคลึงกัน (coefficient) ที่ 0.58 สามารถแบ่งกลุ่มประชากรกระท่อมในภาคใต้จากจังหวัดต่าง ๆ ออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (cluster A และ B) และ 4 กลุ่มย่อย (subcluster A1, A2, B1 และ B2) (Figure 12)

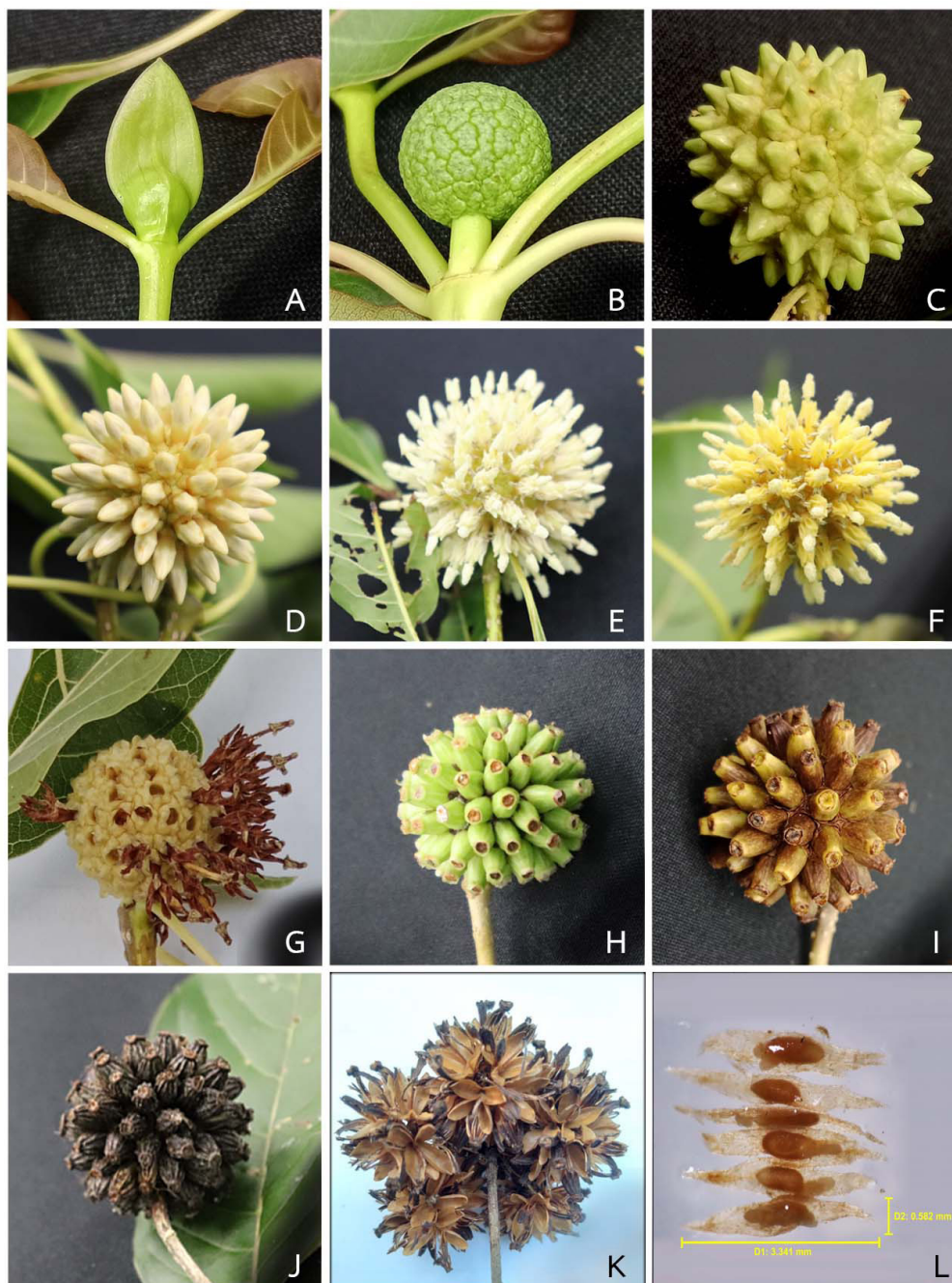


Figure 11 Development of flower and fruit of kratom plants

ลักษณะสัณฐานวิทยาที่พบในประชากรกลุ่ม A มีความสัมพันธ์และมีลักษณะเด่นร่วมกันคือ เป็นกระพุ่มที่มีรูปร่างใบแคบรูปหอก (lanceolate) มีทั้งก้านใบที่อยู่ในกลุ่มสีเขียวและสีแดง โดยประชากรในกลุ่มย่อย A1 ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มกระพุ่มก้านแดงแดงกาว (KDTK) กลุ่มย่อย A2 ประชากรส่วนใหญ่เป็นกลุ่มกระพุ่มก้านเขียวแดงกาว (KKTK) ส่วนกลุ่ม B มีลักษณะเด่นร่วมกันคือ มีรูปร่างใบที่กว้างรูปไข่ (ovate)

และรูปไข่กลับ (obovate) ขอบบริเวณปลายใบมีหยักแบบซี่ฟัน (dentate) มีทั้งก้านใบที่อยู่ในกลุ่มสีเขียวและสีแดง โดยประชากรในกลุ่มย่อย B1 ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มกระพุ่มก้านเขียวใบโพธิ์/โพธิ์เขียว/โพธิ์ทอง/ใบยาง (KKBP) และก้านเขียวหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่ (KKHK) กลุ่มย่อย B2 ประชากรส่วนใหญ่เป็นกลุ่มกระพุ่มก้านเขียวใบโพธิ์/โพธิ์เขียว/โพธิ์ทอง/ใบยาง (KKBP) และก้านแดงหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่ (KDHK)

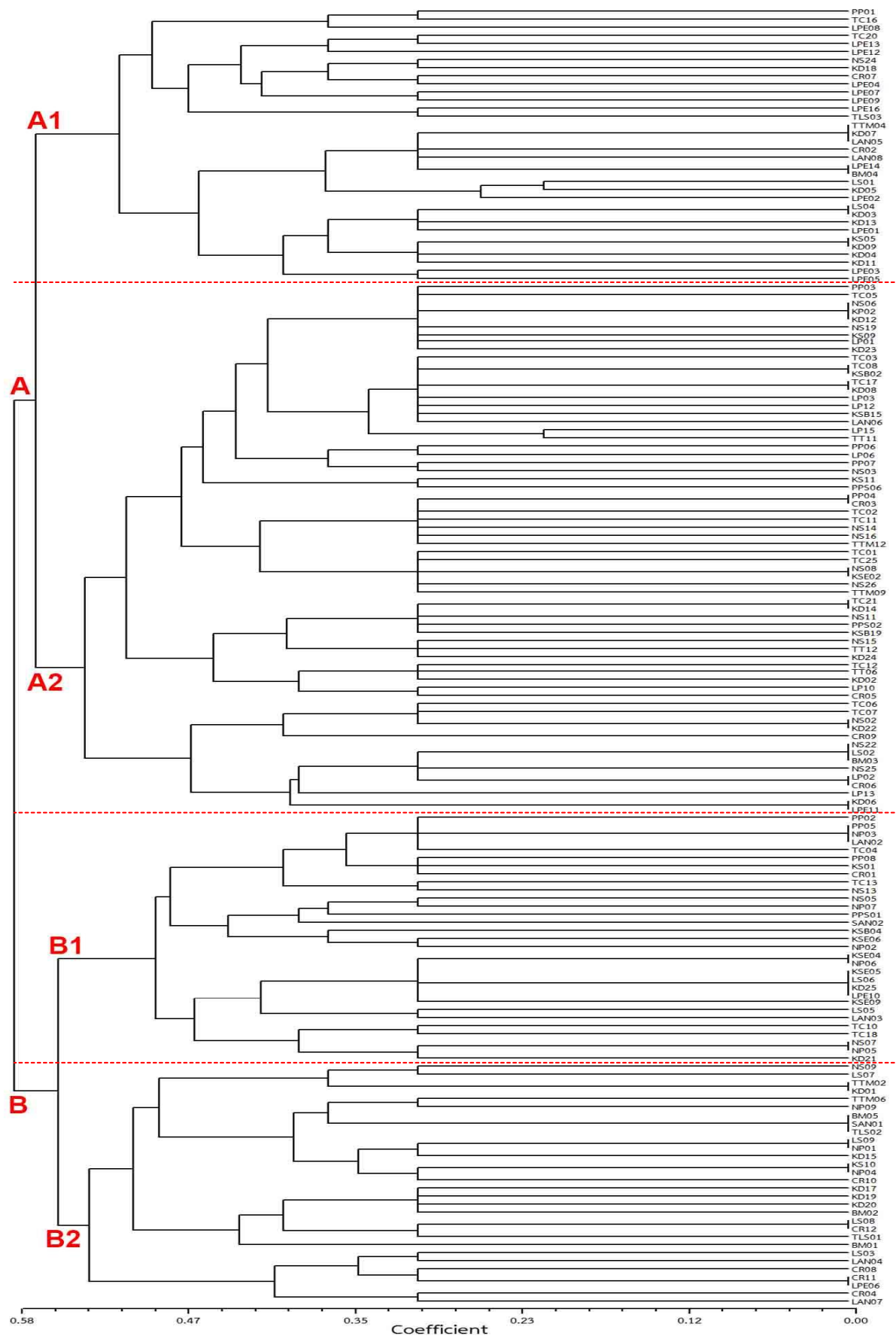


Figure 12 UPGMA dendrogram of kratom plants in Southern Thailand generated by morphological characteristics.

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

กระท่อมที่สำรวจในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยจัดเป็นไม้ยืนต้นระดับสูง มีความหลากหลายของวิสัยถิ่นที่อยู่ตามสภาพแวดล้อมทำให้มีความหลากหลายของสายพันธุ์ตามลักษณะที่ปรากฏ เมื่อจัดจำแนกสายพันธุ์ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1) กลุ่มกระท่อมก้านเขียว สีก้านใบประกอบด้วย สีเขียว เขียวอมเหลือง และเหลืองอมเขียว 2) กลุ่มกระท่อมก้านแดง สีก้านใบประกอบด้วย สีแดง แดงอมส้ม และส้มอมชมพู และเมื่อจำแนกด้วยสีของก้านใบ (petiole color) ร่วมกับรูปร่างใบ (leaf shape) สามารถจำแนกกระท่อมได้ออกเป็น 6 กลุ่มย่อย คือ 1) กระท่อมก้านเขียวแดงกว่า (KKTK) 2) กระท่อมก้านเขียวใบโพธิ์/โพธิ์เขียว/โพธิ์ทอง/ใบยาง (KKBP) 3) กระท่อมก้านเขียวหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่ (KKHK) 4) กระท่อมก้านแดงแดงกว่า (KDTK) 5) กระท่อมก้านแดงใบโพธิ์ (KDBP) และ 6) กระท่อมก้านแดงหางกิ้ง/แมงดา/ยักษ์ใหญ่/เก้ายอด (KDHK) ลักษณะรูปร่างใบ (leaf shape) สามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบ คือ 1) ใบแคบรูปใบหอก (lanceolate) ใบกว้างรูปไข่ (ovate) และใบกว้างค่อนข้างปลายใบรูปไข่กลับ (obovate) ลักษณะโคนใบ (leaf base) สามารถจำแนกได้ 3 แบบ คือ 1) โคนใบแหลมรูปลิ้ม (cuneate) 2) โคนใบมน (obtus) และ 3) โคนใบเว้ารูปหัวใจ (cordate) ลักษณะปลายใบ (leaf apex) สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ 1) ปลายใบเรียวแหลม (acuminate) ปลายใบเป็นติ่งแหลม (cuspidate) ลักษณะขอบใบ (leaf margin) สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ 1) ขอบใบเรียบ (entire) 2) ขอบใบหยักซี่ฟัน (dentate) สีหูใบ (stipule color) สามารถจำแนกได้ 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มสีเขียวและสีเขียวอมเหลือง 2) กลุ่มสีชมพูอมส้มและสีส้มอมชมพู และ 3) กลุ่มสีแดงอมส้มและสีแดง สีของดอกกระท่อมสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ โคนดอกย่อยสีเหลืองอ่อน และสีส้มอมชมพู

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการจัดกลุ่มของต้นกระท่อมที่ศึกษาจะแสดงถึงความแตกต่างและสามารถจัดกลุ่มตามลักษณะสัณฐานวิทยาของใบได้ 8 กลุ่ม โดยวิธี UPGMA แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความคล้ายคลึงกัน (coefficient) ที่ได้ยังถือว่า มีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของใบ อาจมีความแตกต่างไม่ชัดเจนตามลักษณะที่มองเห็น และต้นกระท่อมในแต่ละกลุ่มอาจมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาของใบบางลักษณะที่เหมือนกันแต่ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแปรปรวนภายในพันธุกรรมหรือสภาพแวดล้อมที่ทำให้เกิดความแตกต่างของลักษณะปรากฏ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ $P = G + E$ (P เป็นลักษณะปรากฏ (phenotype), G เป็นค่าทางพันธุกรรม (genotype),

E เป็นอิทธิพลของสิ่งแวดล้อม (environment)) โดยความแปรปรวนของลักษณะปรากฏ (phenotypic variance) ของประชากรสามารถแจกแจงออกได้เป็นความแปรปรวนที่เกิดจากพันธุกรรม (genotypic variance) ร่วมกับความแปรปรวนอันเกิดจากสิ่งแวดล้อม (environmental variance) (Collins et. al., 1987; Caliskan et. al., 2007) เช่น ลักษณะของหยักที่ปรากฏบริเวณปลายใบและเป็นสายพันธุ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของหางกิ้ง แต่การสำรวจไม่ได้พบการมีหยักของทุกใบในต้นเดียวกัน ดังนั้น หากจะวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความชัดเจนของการแบ่งกลุ่มสายพันธุ์ของกระท่อมอาจจะต้องใช้เครื่องมือหลายอย่างมาวิเคราะห์ร่วมกัน เช่น ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ร่วมกับลักษณะทางพันธุกรรมในระดับโมเลกุล หรือลักษณะทางสัณฐานวิทยาร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณสารที่สำคัญในกระท่อม เช่น ไมทราไจนีน (mitragynine) และเซเวนไฮดรอกซีไมทราไจนีน (7-hydroxymitragynine) ซึ่งจะทำการบ่งชี้สายพันธุ์ของกระท่อมมีความชัดเจนและสามารถแยกความแตกต่างทางลักษณะทางพันธุกรรมและลักษณะที่ปรากฏได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณกองทุนป้องกันปราบปราม และแก้ไขปัญหายาเสพติด ของสำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามยาเสพติด (ป.ป.ส.) สำหรับทุนวิจัยภายใต้โครงการศึกษาและเตรียมความพร้อมในการใช้กระท่อมเพื่อการบำบัดรักษา และลดอาการของผู้ติดยาเสพติดประเภทร้ายแรง กรณีปรับแก้กฎหมายยกเลิกกระท่อมจากการเป็นพืชในการกำกับดูแลภายใต้กฎหมายยาเสพติดอย่างบูรณาการ

เอกสารอ้างอิง

- ธนัช นาคะพันธ์. (2559). การศึกษาการใช้ประโยชน์จากกระท่อม ในการรักษาโรคของหมอพื้นบ้านภาคใต้. *วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก*, 14(3), 274-285.
- สำนักงานหอพรรณไม้. (2559). *คู่มือจำแนกพรรณไม้. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช*. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. ห้างหุ้นส่วนจำกัด สิทธิโชค พรินติ้ง. กรุงเทพฯ: 240 หน้า.
- Asanakornchai, S., Saingam, D., Siriwong, A., & Wungsintaweekul, J. (2015). *Conclusion of kratom plant*. Charansanitwong Publisher.
- Caliskan, M.E., Sogut, T., Boydak, E. & Arioglu, H. (2007). Genotype x environment interaction and stability

- analysis of sweetpotato (*Ipomoea batatas*) genotypes, New Zealand. *Journal of Crop and Horticultural Science*, 35(1), 87-99, <https://10.1080/01140670709510172>
- Chittrakarn, S., Sawangjaroen, K., Praseththo, S., Janchawee, B. & Keawpradub, N. (2008). Inhibitory effects of kratom leaf extract (*Mitragyna speciosa* Korth.) on the rat gastrointestinal tract. *J. Ethnopharmacol.*, 116(1), 173-178.
- Chittrakarn, S., Radenahmad, N., Kaewsara, S., Udomuksorn, W., Keawpradub, N., & Phukpattaranont, P. (2018). Gastroprotective effects of methanolic extract of kratom leaves on gastric ulcer and reflux esophagitis in rats. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 40(2), 258-273.
- Collins, W.W., Wilson, L.G., Arrendell, S., & Dickey, L.F. (1987). Genotype × environment Interactions in sweet potato yield and quality factors. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 112(3), 579-583. <https://doi.org/10.21273/JASHS.112.3.579>
- Hemby, S.E., McIntosh, S., Leon, F., Cutler, S.J., & McCurdy, C.R. (2019). Abuse liability and therapeutic potential of the *Mitragyna speciosa* (kratom) alkaloids mitragynine and 7-hydroxymitragynine. *Addiction Biology*, 24(5), 874–885. <https://doi.org/10.1111/adb.12639>
- Houghton, P.J., Latiff, A., & Said, I. M. (1991). Alkaloids from *Mitragyna speciosa*. *Phytochemistry*, 30 (1), 347–350. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(91\)84152-I](https://doi.org/10.1016/0031-9422(91)84152-I)
- Kumarnsit, E., Keawpradub, N. & Nuankaew, W. (2006). Acute and long-term effects of alkaloid extract of *Mitragyna speciosa* on food and water intake and body weight in rats. *Fitoterapia*, 77, 339-345.
- Meepong, R., & Sooksawate, T. (2019). Mitragynine reduced morphine-induced conditioned place preference and withdrawal in rodents. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences (TJPS)*, 43(1), 21-29.
- Rohlf, F.J. (1997). *NTSYS-Pc. Numerical taxonomy and multivariate analysis system version 2.2e*. Exeter Software.
- Sneath, P.H. & Sokal, R.R. (1973). *Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification*. W. H. Freeman.

การพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่น สายพันธุ์ ออเรนจ์แมน บนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง

Development of smart control system for cultivation of orange man Japanese melon in greenhouses via IoT platform

ลัญจนกร นิลทรัตน์¹, สมศักดิ์ อรรถกิติมากุล¹ และ ศรัณย์ ณรงค์กุล^{2*}

Lanchakorn Nintarat¹, Somsak Akatimagool¹ and Sarun Narongkul^{2*}

Received: 9 June 2023 ; **Revised:** 11 September 2023 ; **Accepted:** 6 October 2023

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมน บนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง (internet of things) สถานที่วิจัย ณ ออร์แกนิก คอมเพลทฟาร์ม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบควบคุมอัจฉริยะและควบคุมสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติให้มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นกล้า และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานโรคพืชก่อนนำต้นกล้างลงปลูกในโรงเรือน การออกแบบโครงสร้างโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าสามารถรองรับการเพาะเลี้ยงได้สูงสุด 360 ต้น เพื่อให้ได้ต้นอ่อนเมล่อนที่สมบูรณ์สำหรับนำไปปลูกต่อในโรงเรือนระบบปิด ขนาด 600×1800×300 ซม. โดยระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 5 ส่วนได้แก่ 1) การออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า 2) การออกแบบวงจรควบคุม 3) การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ 4) การออกแบบผังงาน และ 5) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานด้วยแพลตฟอร์มบริงไโอที (Blynk IoT platform) เวอร์ชัน (version) 2.0 เพื่อแสดงผลบนเว็บแอปพลิเคชัน (web application) และบนโมบายแอปพลิเคชัน (mobile application) ผลการทดสอบพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลและควบคุมการทำงานได้อย่างแม่นยำ ระบบควบคุมอัตโนมัติทำงานถูกต้องตามเงื่อนไข นอกจากนี้พบว่าระบบสามารถเพิ่มอัตราการงอกและประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของต้นกล้า เมล่อนญี่ปุ่นได้สูงขึ้น มีอัตราการงอกสมบูรณ์ร้อยละ 93.33 เมื่อเทียบกับการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิม ด้านความสูงพบว่าต้นกล้าที่ปลูกผ่านระบบมีความสูงเฉลี่ย 6.5 ซม. เมื่อเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.76 ซึ่งเห็นได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มอัตราการงอกและลดความเสียหายของต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัจฉริยะ, โรงเรือนอนุบาลต้นกล้า, อินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง, เมล่อนญี่ปุ่น

Abstract

We present a smart control system for cultivation of orange man Japanese melon in greenhouses via IoT platform. The study was performed at an organic complete farm. The objective of this research was to create a smart control system and control the environment inside a greenhouse to provide optimal conditions for seedling growth. The designed structure of the nursery greenhouse could accommodate a maximum of 360 seedlings, allowing the cultivation of healthy and complete melon seedlings within an area of 600x1800x300 cm before transplanting them for actual cultivation. This smart system design was divided into five parts: 1) seedling nursery design, 2) control system design, 3) photovoltaic system setup, 4) workflow design, and 5) user interface design; the user interface was designed by using the Blynk IoT platform version 2.0 to monitor all results on web applications and mobile applications. The results

¹ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

² สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและไอโอที มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา สงขลา 90000

¹ Department of teacher training in electrical engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

² Department of Information Technology and IoT, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

* Corresponding author: E-mail: sarun.ch@skru.ac.th

showed that the developed system could effectively monitor and control according to the setting conditions. Additionally, the system could increase germination rates and enhance the growth efficiency of Japanese organic melon seedlings. The germination rate improved by 93.33% compared to traditional nursery cultivation methods. It was found that the seedlings grown through this smart system had an average height of 6.5 cm, which indicated a growth rate increase of 54.76% compared to traditional cultivation methods. It was concluded that the developed system effectively enhanced the germination rate and reduced damage to Japanese melon seedlings.

Keywords: Smart control system, seedling nursery, internet of things, Japan melon

บทนำ

วิวัฒนาการของภาคการเกษตรไทยดำเนินมาอย่างต่อเนื่องด้วยแรงกระตุ้นสำคัญจากวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และนวัตกรรม ที่ทำให้วิถีการเกษตรเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบดั้งเดิม ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่มากขึ้น ตั้งแต่เริ่มแรกในยุคเกษตรกรรม 1.0 จนมาถึงปัจจุบันมาในยุคเกษตรกรรม 4.0 (smart farming) ซึ่งเป็นการทำการเกษตรเน้นนวัตกรรมเกษตรอัจฉริยะ (smart agriculture) ใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและ ลดปัญหาความไม่แน่นอนของธรรมชาติ (นิพนธ์ พัวพงศกร และคณะ, 2563) โลกปัจจุบันได้เข้าสู่ยุคอินเทอร์เน็ต ประสานสรรพสิ่ง (internet of things) เป็นยุคที่มีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ ไม่ว่าจะเป็น AI (artificial intelligence) / Big Data / Blockchain มาเป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาการทำเกษตรแบบดั้งเดิม (traditional farming) ไปสู่การเกษตรสมัยใหม่ (Elijah *et al.*, 2018) เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตร อีกทั้งยังพบว่าการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาด้านการเกษตร สามารถแก้ไขปัญหามูลค่าผลผลิตทางการเกษตรที่ต่ำได้เป็นที่ประจักษ์ (Dagar *et al.*, 2018)

เมล่อนเป็นพืชที่มีความสำคัญและให้ผลตอบแทนสูงในเศรษฐกิจ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอากาศอบอุ่นและร้อนจะเหมาะสมกับการเพาะปลูก เมล่อนที่สามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยสายพันธุ์ของพืชตระกูลเมล่อนมีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศอินเดีย การปลูกเมล่อนให้ได้คุณภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภคในสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยเป็นความท้าทายอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคใต้ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีฝนตกชุกและความชื้นสัมพัทธ์สูง ทำให้ง่ายต่อการเกิดโรคและแมลงศัตรูพืช เพราะเมล่อนเป็นพืชที่อ่อนแอต่อโรคและแมลงศัตรูพืช (ศุภครุษา อภิศิตกร และคณะ, 2020) ดังนั้นการปลูกเมล่อนต้องใช้วิธีการปลูกดูแลรักษาที่แตกต่างกันไปจากพืชอื่นๆ และปัญหาหนึ่งของการปลูกเมล่อนคือปัญหาเกี่ยวกับการอนุบาลเมล็ดพันธุ์ต้นกล้าในระยะเริ่มต้น เกษตรกรจะเผชิญกับปัญหาต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ด เช่น การงอกไม่สม่ำเสมอ โรครากเน่า การควบคุมระบบน้ำและ

ความชื้น อุณหภูมิและแสงสว่างที่ไม่เหมาะสม ทำให้มีผลต่อแผนการผลิตพืชและทำให้ผลผลิตของพืชต่อพื้นที่ปลูกลดลงเนื่องจากต้นกล้าพืชที่ทำการอนุบาลไว้ไม่สมบูรณ์และแข็งแรง (ภาวิณี เหลืองประเสริฐ และคณะ, 2562) การปลูกเมล่อนในโรงเรือนระบบปิดจึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากโรงเรือนระบบปิดจะช่วยควบคุมสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติให้เป็นไปในระดับที่เหมาะสม (อัคคพล เสนาณรงค์, 2563) โดยเฉพาะการควบคุมองค์ประกอบอากาศ เช่น ลม ฝน และลดการรบกวนจากแมลงศัตรูพืชได้ นอกจากนี้การปลูกในโรงเรือนยังช่วยป้องกันความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่แปรปรวน (Akkas & Sokullu, 2017) ดังนั้นการเพาะปลูกเมล่อนในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าที่มีการสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมร่วมกับการใช้เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพ จะช่วยให้ได้ต้นกล้าที่สมบูรณ์แข็งแรง ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพตามความต้องการของผู้บริโภค ทำให้เกษตรกรได้ต้นกล้าพืชคุณภาพดีพร้อมทำการปลูกได้ทันที รวมไปถึงต้นกล้าที่ทำการอนุบาลก่อนปลูกมีความต้านทานโรคหรือศัตรูพืชอีกด้วย

จากแนวทางดังกล่าวข้างต้นคณะผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหา จึงพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเพาะต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นพันธุ์ออเรนจ์แมน (Figure 1) ในโรงเรือนเพื่อเตรียมความพร้อมของต้นกล้า ก่อนการลงปลูกในโรงเรือนหลัก โดยการปรับสภาพแวดล้อมในโรงเรือนให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโต เพื่อเพิ่มอัตราการงอกของ



Figure 1 Japanese melon Orange man



Figure 2 Traditional melon seedling cultivation

ต้นกล้าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพาะปลูกแบบดั้งเดิม (Figure 2) และยังอำนวยความสะดวกให้แก่เกษตรกร ลดภาระในการดูแล ไม่สิ้นเปลืองทรัพยากร เพิ่มอัตราการงอกของต้นกล้า เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร และลดความเสี่ยงต่อความเสียหายในการปลูกพืชให้ตรงตามมาตรฐานที่ตลาดต้องการ

การออกแบบและพัฒนาระบบ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสร้างระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมน (orange man) โดยการเพาะปลูกภายในโรงเรือนอนุบาล ต้นกล้าใช้การควบคุมสภาพแวดล้อมบนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งระบบที่พัฒนาขึ้นได้รับความอนุเคราะห์โดยใช้สถานที่ในการติดตั้งและทดสอบเครื่องมือวิจัย ณ ออร์แกนิก คอมเพล็กซ์ฟาร์ม ตำบลโคกม่วง อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา (ละติจูด 6.897, ลองจิจูด 100.412) เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ภายในระบบอนุบาลปลูก และเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมให้มีความเหมาะสมสำหรับการอนุบาลปลูก การออกแบบจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ 1) การออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า 2) การออกแบบวงจรควบคุม 3) การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ 4) การออกแบบผังงาน และ 5) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ งานซึ่งผู้วิจัยจะแสดงรายละเอียดตามลำดับ และแสดงภาพรวมของระบบที่พัฒนาขึ้น (Figure 3)

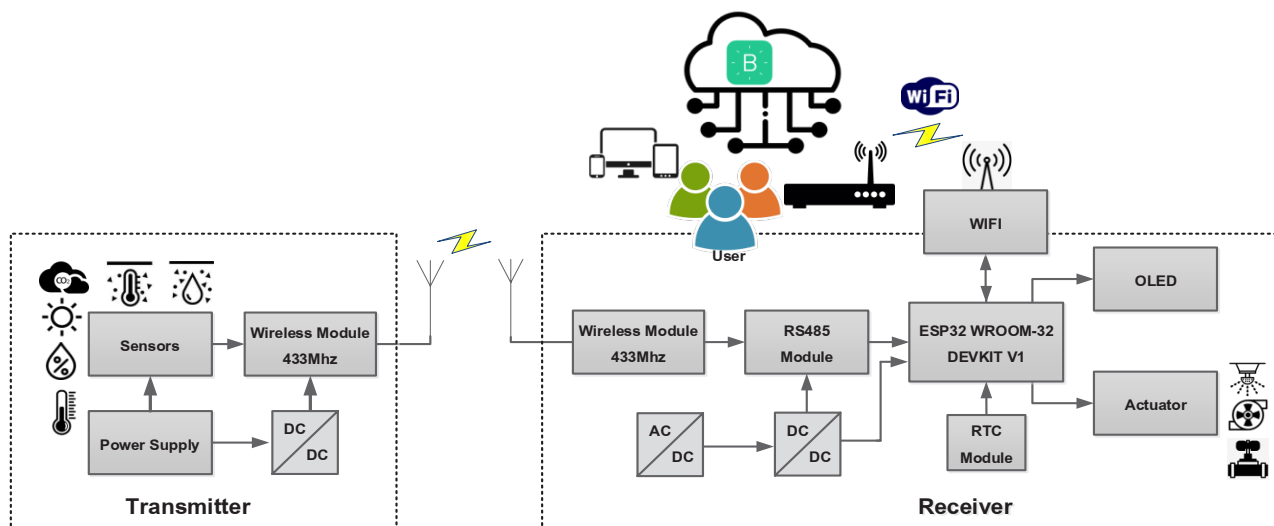


Figure 3 Overview of the developed control system

1. การออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า

การออกแบบลักษณะโครงสร้างของระบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า โครงสร้างของโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าประกอบไปด้วยวัสดุเหล็ก Galvanized ทำเป็นส่วนฐานล่าง ส่วนฐานบนเป็นเหล็กโครงหลังคาสำหรับติดตั้งพลาสติกใสชนิด Poly ethylene (PE) ป้องกันความชื้นจากฝน มีความยืดหยุ่นสูง สะท้อนรังสียูวีจากแสงอาทิตย์ได้ดี ส่วนรอบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าใช้มุ้งตาข่าย

ล้อมรอบไว้เพื่อป้องกันแมลง ภายในติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุมประกอบไปด้วยหัวพ่นหมอก 12 หัว โดยใช้ยี่ห้อหลักคัน 4 เส้น บนหลังคา ลักษณะการติดตั้งจะใช้วิธียึดหัวพ่นหมอกแบบพินปลา ส่วนบริเวณที่ใช้สำหรับอนุบาลเมล็ดต้นกล้าจะใช้ถาดหลุมจำนวน 6 แผ่น มีขนาดยาว 160 ซม. กว้าง 75 ซม. สามารถรองรับการเพาะเลี้ยงต้นกล้าเมล่อนได้สูงสุด 360 ต้น โครงสร้างการออกแบบ (Figure 4) และโครงสร้างโรงเรือนที่เสร็จสมบูรณ์ (Figure 5)

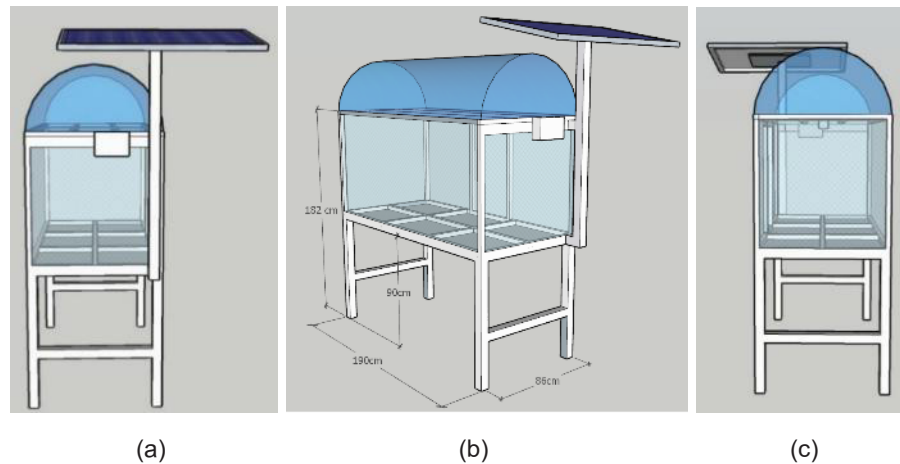


Figure 4 The structure of the seedling nursery system. (a) Left side (b) Back side (c) Right side

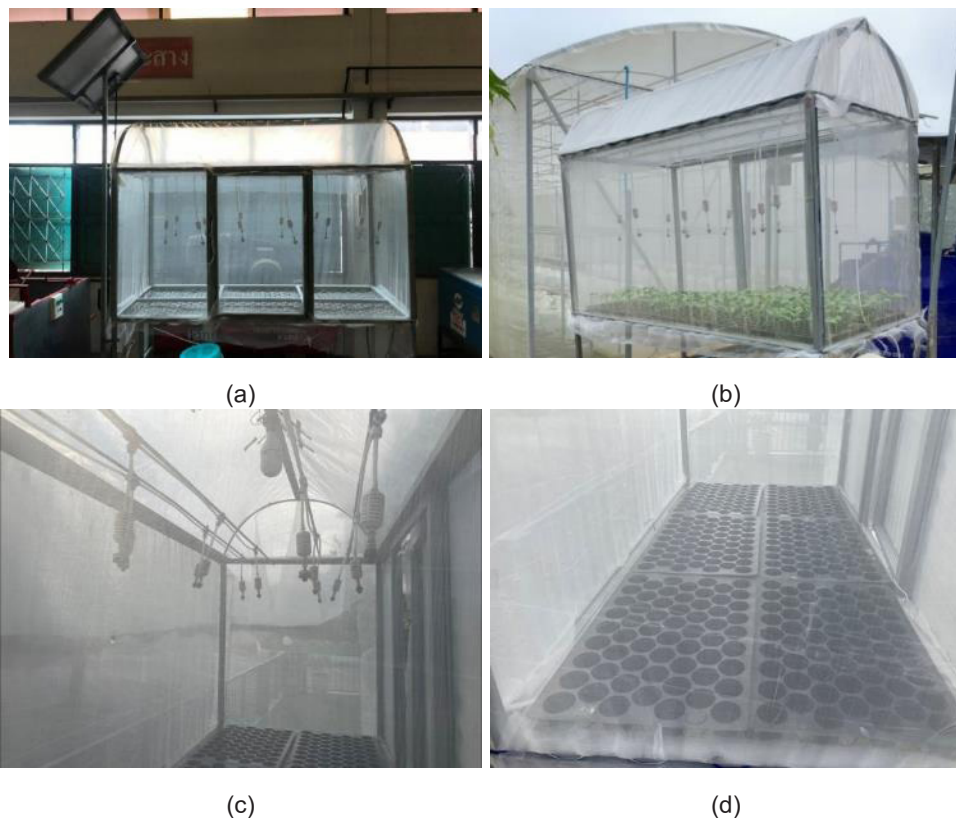


Figure 5 Outside and inside of the seedling nursery at an organic complete farm research site.

(a) Front (b) Back side (c) Fogging system (d) Seedling tray

2. การออกแบบวงจรและชุดควบคุม

การออกแบบวงจรสำหรับควบคุมการทำงาน ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ 1) ภาควินพุตสำหรับเชื่อมต่อรับอุปกรณ์เซนเซอร์ ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (air temperature) เซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์ (air humidity) เซนเซอร์ความเข้มแสง (light intensity) เซนเซอร์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Co2) ซึ่งเป็นการวัดค่าสภาพแวดล้อม

บรรยากาศในโรงเรือน และอีกส่วนหนึ่งเป็นการวัดค่าสภาพแวดล้อมภายในวัสดุสำหรับการเพาะปลูก ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิ (soil temperature) และวัดค่าความชื้น (soil humidity) โดยเซนเซอร์ทั้งหมดจะติดต่อสื่อสารแบบ Modbus RTU ที่ให้ค่าที่มีความแม่นยำผ่านโมดูล Max485 ไปยังส่วนประมวลผลแสดงการออกแบบติดตั้ง (Figure 6)

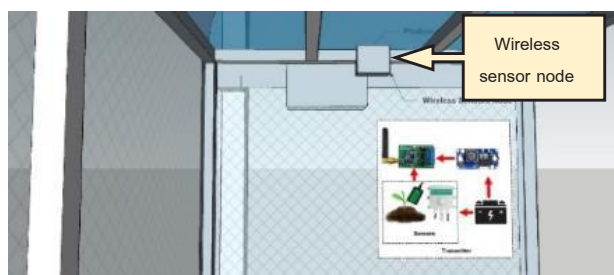


Figure 6 Wireless sensor node installation design

2) ภาคประมวลผล ในการออกแบบครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้บอร์ดรุ่น DTE32 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะสำหรับงานด้านเกษตรแม่นยำที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น (ลัญจนกร นิลทรัตน์ และคณะ, 2023) เป็นส่วนประมวลผลและควบคุมการทำงาน เนื่องด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์อินพุตที่หลากหลาย สะดวกและง่ายในการเชื่อมต่อใช้งาน และสามารถเขียนคำสั่งผ่านโปรแกรม Arduino IDE แสดงอุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะที่ใช้ในการควบคุม (Figure 7)

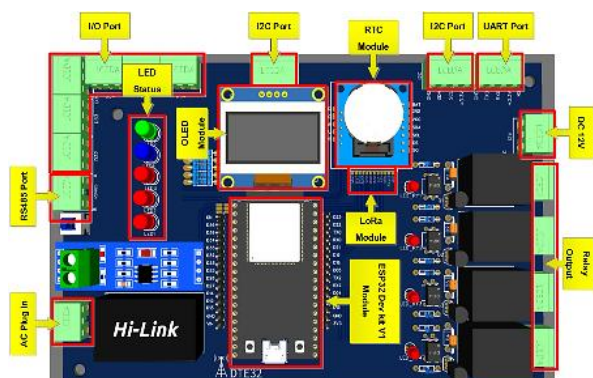


Figure 7 Smart control devices

3) ภาคเอาต์พุต จะทำหน้าที่รับคำสั่งจากภาคประมวลผลภายในอุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะ DTE32 เพื่อควบคุมการทำงานของระบบจ่ายน้ำและระบบพ่นหมอกภายในโรงเรือนที่ทำงานตามเงื่อนไข โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานผ่านรีเลย์ และมีการแสดงผลข้อมูลผ่านจอ OLED ขนาด 0.96 นิ้ว 4) ภาคสื่อสารข้อมูลไร้สาย ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนรับส่งข้อมูลเซนเซอร์ ต่าง ๆ จากโรงเรือน ในที่นี้จะใช้การรับส่งข้อมูลผ่าน Wireless transceiver module ความถี่ใช้งานที่ 433 MHz ต่อร่วมกับเซนเซอร์ Modbus RTU ภายในโรงเรือนเป็นภาคส่ง ในส่วนของภาครับจะใช้โมดูลเดียวกันต่อเข้ากับโมดูล Max485 ของวงจรควบคุม (Figure 8)

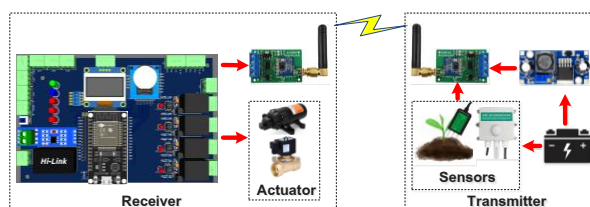


Figure 8 Wireless sensor nodes unit

3. การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor nodes) ที่อยู่ภายในโรงเรือน โดยได้ออกแบบโครงสร้างแผงโซลาร์เซลล์มีขนาด $28 \times 34 \times 10$ เซนติเมตร มีความสูงจากพื้นดิน 400 เซนติเมตร แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาโรงเรือนขนาด 180 W ต่อผ่านอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติ (solar charge controller) เพื่อให้การชาร์จกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในส่วนของแบตเตอรี่ที่ใช้ในครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้แบตเตอรี่ Deep cycle ชนิดแห้งขนาด 12V / 12Ah ซึ่งเมื่อพิจารณาจากโหลดที่เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายทั้งหมดที่ติดตั้งในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าแล้ว พบว่าปริมาณของไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งาน ดังแสดง Figure 9-10 ตามลำดับ

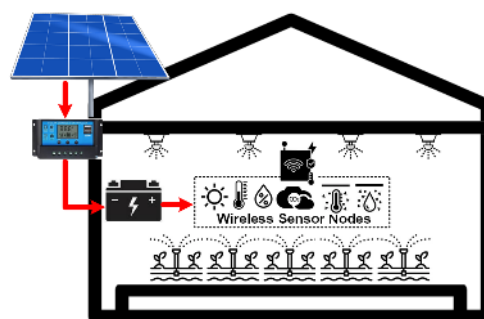


Figure 9 Photovoltaic system design

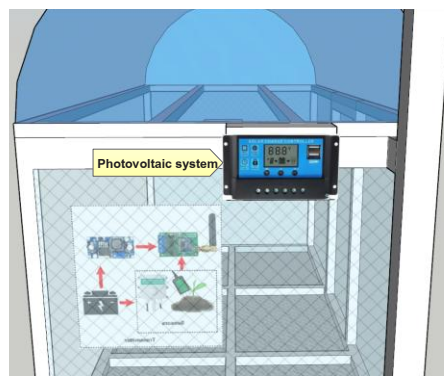


Figure 10 Photovoltaic system installation design

4. การออกแบบผังงาน

การออกแบบผังงานนั้น ผู้วิจัยทำการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับการอนุบาลปลูกต้นกล้าเมล่อน จากงานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง (ภาวิณี เหลืองประเสริฐ และคณะ, 2562; ศุภครุษา อภิตติกร และคณะ, 2020) จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า พืชตระกูล เมล่อนมีลักษณะการเจริญเติบโตในสภาวะอากาศอบอุ่นถึงร้อน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดิน เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชตระกูลเมล่อน และพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50 - 70% ระดับความเป็นกรดค่า pH 6.5 - 7.0 โดยผู้วิจัยได้ออกแบบระบบให้สามารถควบคุม สภาพแวดล้อมให้เหมาะสมตามเงื่อนไข เพื่อให้เมล็ดพันธุ์ที่อนุบาลปลูกมีอัตราการงอกสูงสุด แสดงการออกแบบผังงาน (Figure 11)

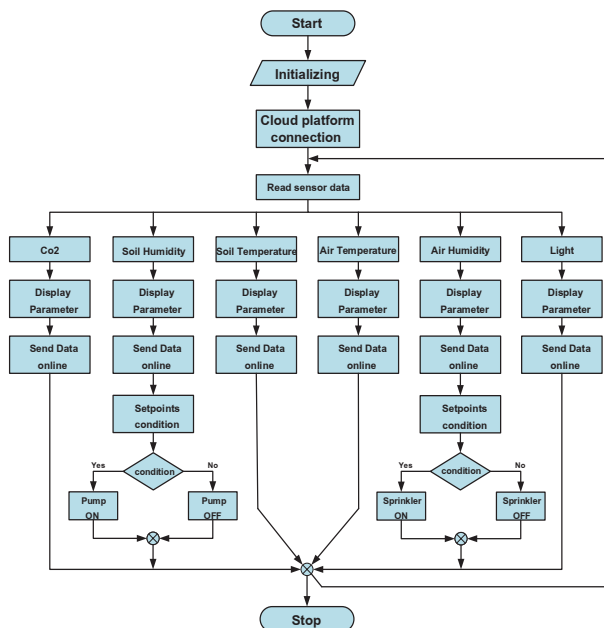
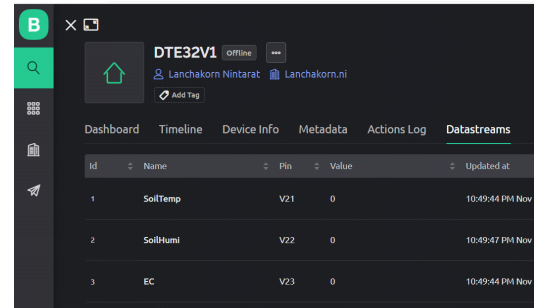


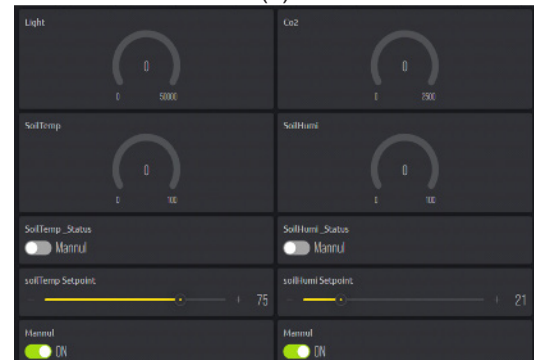
Figure 11 The flow operation of the control system

5. การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

ส่วนนี้จะเป็นการออกแบบส่วนแสดงผลและควบคุมบนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง แพลตฟอร์มที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ คือ แพลตฟอร์มบริงโอไอที เวอร์ชัน 2.0 ซึ่งมีจุดเด่นที่สามารถแสดงผลและควบคุมทั้งบนเว็บแอปพลิเคชันและบนโมบายแอปพลิเคชัน โดยการออกแบบ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วยในส่วนของการออกแบบเพื่อแสดงผลและควบคุมค่าพารามิเตอร์บนเว็บแอปพลิเคชัน ดัง Figure 12 และอีกส่วนหนึ่งจะแสดงผลและควบคุมค่าพารามิเตอร์บน โมบายแอปพลิเคชัน ดัง Figure 13



(a)



(b)

Figure 12 Web application design (a) Parameter setting

(b) User interface design



(a)

(b)

Figure 13 Mobile application design

(a) User interface design (b) Control system design

ผลการทดลอง

จากการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมน บนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้ ดำเนินการมา โดยจะแบ่งขั้นตอนดังนี้ 1) ผลการติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ 2) ผลการวัดทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ 3) ผลการทดสอบการแสดงผลส่วนติดต่อผู้ใช้งาน 4) ผลการทดสอบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ด้านเอาต์พุต 5) ผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน และ 6) ผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโต อัตราการรอดของต้นกล้า

เทียบกับการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิม โดยจะแสดงรายละเอียดตามลำดับ

1. ผลการติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์

การติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์สำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าเมล็ดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ระบบแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ติดตั้งภายในโรงเรือน โดยอุปกรณ์ระบบจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์ได้ติดตั้งไว้ภายนอก ดัง Figure 14 ส่วนที่ 2 อุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สาย ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ภายในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า จากนั้นทำการส่งข้อมูลไร้สายผ่าน Wireless transceiver module ไปยังส่วนของภาครับที่อยู่ภายนอกโรงเรือน ดัง Figure 15 ส่วนที่ 3 เป็นการติดตั้งวงจรควบคุมทางภาครับ ในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากชุดอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ติดตั้งอยู่ภายในโรงเรือนเพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลและตัดสินใจตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ไปควบคุมอุปกรณ์ด้านเอคต์พุด ได้แก่ อุปกรณ์ปั๊มจ่ายระบบน้ำ และระบบพ่นสเปย์หมอกในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า อีกทั้งส่งข้อมูลทั้งหมดเพื่อไปแสดงผลสถานะและควบคุมบนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง ซึ่งระบบดังกล่าวได้ทำการติดตั้งภายในอาคาร ควบคุมการทำงานหลักอยู่ภายนอกโรงเรือนอนุบาลปลูกต้นกล้า ดัง Figure 16

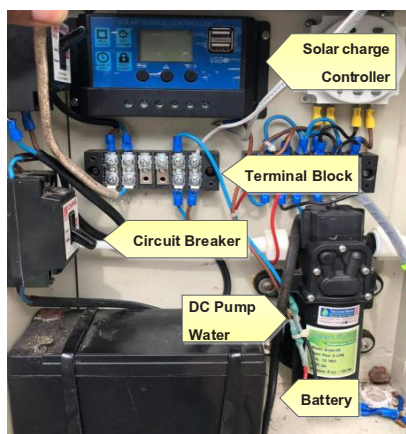


Figure 14 Installation of photovoltaic sources

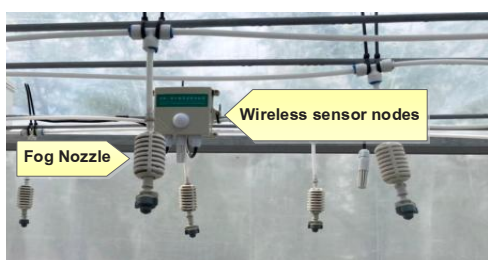


Figure 15 Installation of wireless sensor nodes

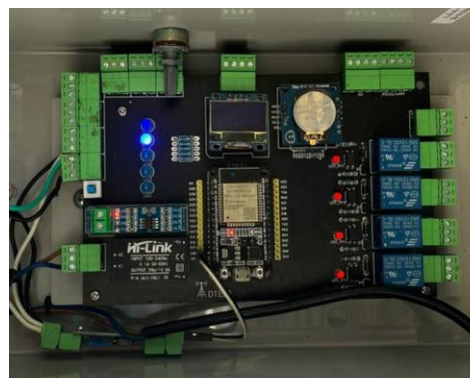


Figure 16 Installation of smart control devices

2. ผลการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์เสร็จสิ้น ในส่วนนี้จะเป็นการวัดและทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้งานกับระบบที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานโดยค่าที่จะทดสอบในครั้งนี้จะประกอบไปด้วยค่าอุณหภูมิอากาศ และค่าความชื้นในดิน ซึ่งค่าดังกล่าวจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือน (สหพงศ์ สมวงศ์ และคณะ, 2022) ในช่วงเริ่มต้นสำหรับการอนุบาลปลูกต้นกล้าซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวจะแสดงดัง Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ Table 1 แสดงการทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิในอากาศ ที่ใช้กับระบบควบคุมในครั้งนี้ (4in1 CO2 Temperature Humidity and Light RS485 Output) กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Elitech HTC-2) โดยได้กำหนดค่าทดสอบดัง Table 1 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์ที่ใช้ในระบบเป็นจำนวน 5 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%Error) ตามสมการที่ (1) (กันตภณ มะหาหมัด และคณะ, 2022) ผลปรากฏว่าเซนเซอร์ที่ทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.62 และเมื่อนำผลการวัดมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการวัดเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.998 แสดงว่าเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิในอากาศที่ใช้กับระบบควบคุมในครั้งนี้มีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับเครื่องวัดมาตรฐานและอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้ดัง Figure 17

$$\%Error = \frac{|E_{mea} - E_t|}{E_t} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ E_{mea} คือ ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทดสอบ
 E_t คือ ค่าจากการวัดด้วยเครื่องวัดมาตรฐาน

Table 2 แสดงการทดสอบค่าความเที่ยงตรงของอุปกรณ์เซนเซอร์วัดค่าความชื้นในดิน ที่ใช้กับระบบ ควบคุม ในครั้งนี้ (EC temperature humidity PH sensor RS485 output) กับเครื่องวัดมาตรฐาน (smart sensor PH328) โดยได้กำหนดค่าทดสอบดัง Table 2 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์ที่ใช้ในระบบเป็นจำนวน 5 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ยจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%Error) ดังสมการที่ (1) (กันตภณ มะหาหมัด และคณะ, 2022) ผลปรากฏว่าเซนเซอร์ ที่ทำการทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 0.56 และเมื่อนำผลการวัดมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการวัดเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 แสดงว่าเซนเซอร์วัดค่าความชื้นในดินที่ใช้กับระบบควบคุมในครั้งนี้มีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับเครื่องวัดมาตรฐานและอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้ดัง Figure 18

Table 1 Results of air temperature calibration

True value E_t	Measure value E_{ms}						%Error
	1	2	3	4	5	Average	
25.2	25.6	25.4	25.6	25.2	25.4	25.44	0.95
27.3	27.3	27.7	27.6	27.3	27.4	27.46	0.58
29.1	29.3	29.1	29.5	29.5	29.2	29.32	0.75
31.2	30.5	31.2	31.5	30.7	31.2	31.02	0.57
33.1	32.7	33.5	33.2	33.4	32.8	33.12	0.24
Total average							0.62

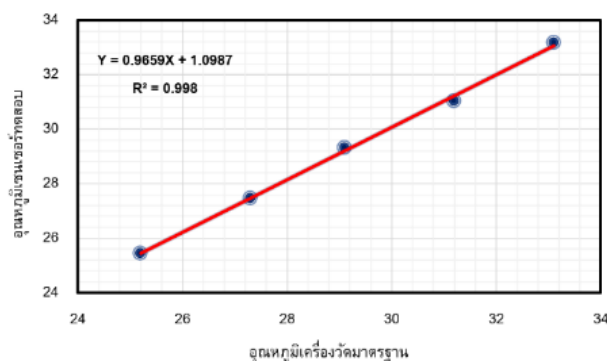


Figure 17 The results of correlation analysis

Table 2 Results of soil moisture calibration

True value E_t	Measure value E_{ms}					%Error	
	1	2	3	4	5		Average
5.1	3.85	4.6	5.6	5.2	5.8	5.01	0.2
20.2	19.8	20.4	19.3	20.5	21.1	20.22	0.88
40.1	39.3	41.2	41.9	42.1	38.8	40.66	0.39
60.2	58.7	60.7	61.4	60.5	62.4	60.74	0.39
80.1	78.8	82.5	81.4	80.4	82.2	81.06	0.94
Total average							0.56

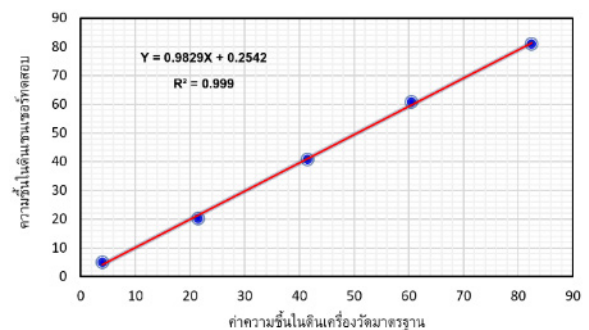
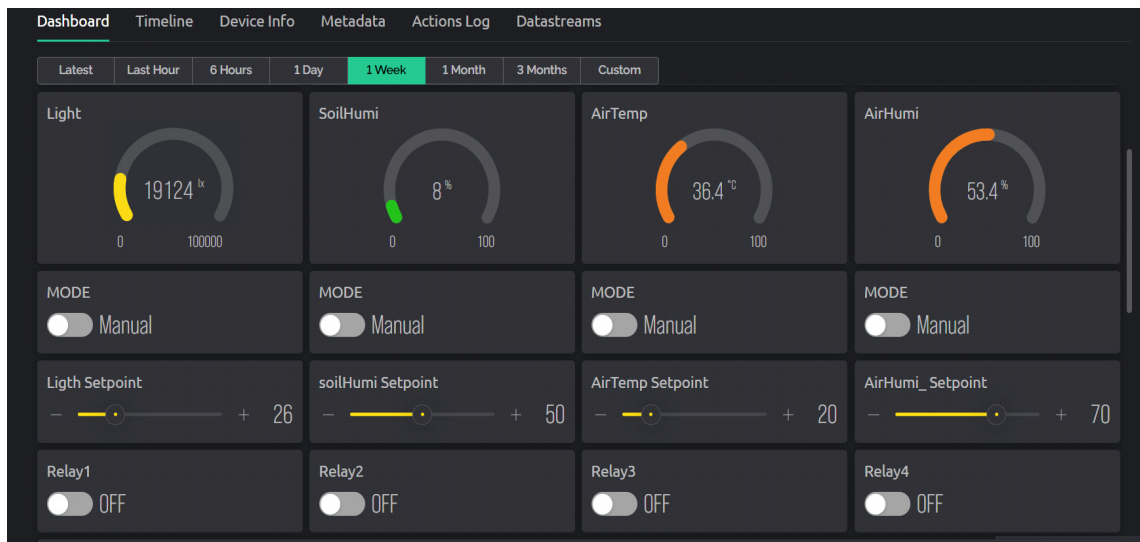


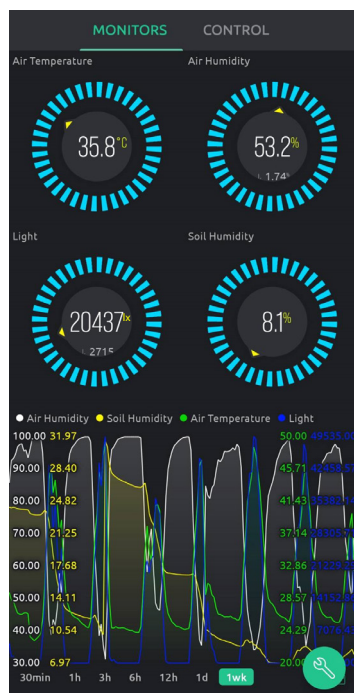
Figure 18 The results of correlation analysis

3. ผลการทดสอบการแสดงผลส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

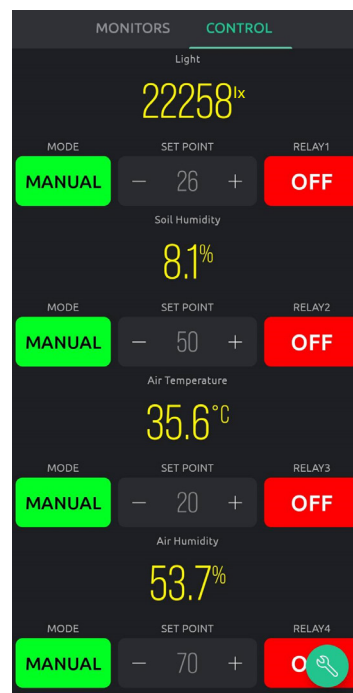
ส่วนนี้เป็นการทดสอบการแสดงผลของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ทำการส่งสัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์อินพุตเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบความเที่ยงตรงและประมวลผลตามลำดับผังงานที่ได้ออกแบบไว้ และส่งต่อข้อมูลไปยังส่วนแสดงผลบนแพลตฟอร์มบรีงไอโอที เวอร์ชัน 2.0 โดยผู้วิจัยได้แบ่งการแสดงผลเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย 1) การแสดงผลและควบคุมค่าพารามิเตอร์บนเว็บแอปพลิเคชัน 2) การแสดงผลและควบคุมค่าพารามิเตอร์บนโมบายแอปพลิเคชันดัง Figure 19



(a)



(b)



(c)

Figure 19 User interface design. (a) Web application Design. (b) Mobile application design. (c) Control design

4. ผลการทดสอบควบคุมอุปกรณ์แอร์ฟุต

เมื่อส่วนติดต่อผู้ใช้งานสามารถแสดงผลค่าจากอุปกรณ์อินพุตเซนเซอร์ได้แล้ว ลำดับถัดไปจะเป็นการทดสอบการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แอร์ฟุตที่มีการเชื่อมต่อกับระบบจ่ายน้ำและระบบพ่นสเปรย์หมอกภายในโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนโดยผู้วิจัยได้ออกแบบระบบให้สามารถควบคุมการทำงานใน

ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งานทั้งบนเว็บแอปพลิเคชัน และบนโมบายแอปพลิเคชัน ซึ่งการทำงานจะกำหนดรูปแบบการทำงานเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) การกำหนดค่าด้วยตนเอง และ 2) การกำหนดค่าแบบอัตโนมัติ โดยการทดสอบในครั้งนี้จะทดสอบความแม่นยำในการสั่งงานของระบบที่ออกแบบให้สามารถทำงานตามเงื่อนไขของผังงานที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดัง Table 3

Table 3 Results of output device control testing

Control pattern	Number of times (times)	Accuracy (times)	Accuracy percentage
Web Application	10	10	100
Mobile Application	10	10	100
Automatic System	10	10	100
Average	10	10	100

Table 3 แสดงผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์แอตทูตบนส่วนติดต่อผู้ใช้งานโดยได้ทดสอบควบคุมการทำงานทั้งบนเว็บแอปพลิเคชัน และบนโมบายแอปพลิเคชันจำนวน 10 ครั้ง ผลปรากฏว่าส่วนติดต่อผู้ใช้งานทั้ง 2 ส่วนสามารถควบคุมการทำงานทั้งแบบปกติและแบบอัตโนมัติได้อย่างแม่นยำ มีความถูกต้องคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 100 ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

5. ผลการทดสอบควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือน

ส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาระบบในครั้งนี้ในการทดสอบผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์เซนเซอร์ไร้สายที่ผ่านการทดสอบความเที่ยงตรงมาติดตั้งภายในโรงเรือนที่ได้ออกแบบไว้เพื่อเก็บข้อมูล จากนั้นทดสอบการทำงานของระบบโดยการกำหนดค่าในส่วนติดต่อผู้ใช้งานเพื่อควบคุมตามความเหมาะสมของการอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 50 - 70 % และค่าความชื้นในดินอยู่ที่ 70 - 75 % โดยจะแสดงผลการควบคุมดัง Figure 20

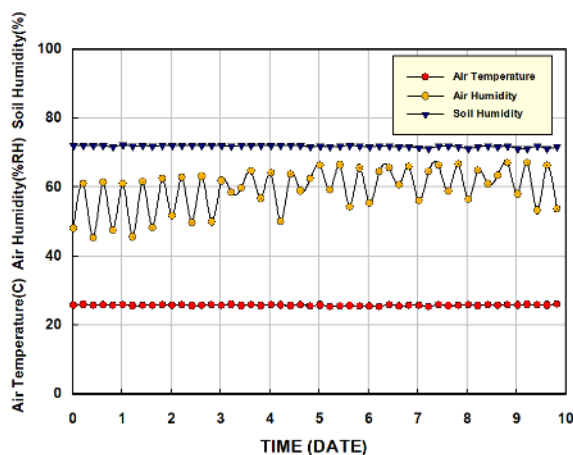


Figure 20 Results of controlling the environment in the greenhouse

6. ผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตต้นกล้า

ส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและอัตราการงอกของต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนระหว่างการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิมกับระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าที่พัฒนาขึ้น มีขั้นตอนการเตรียมต้นกล้าเมล่อนก่อนนำไปอนุบาลในถาดสำหรับเพาะปลูกประกอบไปด้วยการนำเมล็ดเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนแช่ด้วยน้ำอุ่นใช้เวลา 4 ชั่วโมง และบ่มในผ้าสะอาดหมาดน้ำ จากนั้นใส่ในกล่องพลาสติก ปิดฝาทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ส่วนรากเมล็ดเมล่อนเริ่มงอกออกมาจากเมล็ดเล็กน้อย จากนั้นนำเมล็ดเมล่อนไปทำการอนุบาลต่อในวัสดุปลูก รดน้ำให้ชุ่มชื้น หยอดเมล็ดในถาดปลูกให้อยู่ตรงกลางและกลบด้วยวัสดุปลูกพีทมอส (Peat moss) บางๆ พร้อมกับรดน้ำให้ชุ่มชื้น นำถาดอนุบาลต้นกล้าไปเก็บภายในโรงเรือนที่ได้รับแสงแดดเต็มที่ ในการทดลองจะใช้ถาดอนุบาลขนาด 60 หลุม จากนั้นแบ่งการอนุบาลออกเป็น 2 ส่วน คือการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับอนุบาลปลูกที่ใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้น ผลการเปรียบเทียบดัง Table 4

Table 4 Comparison of growth and germination rates

Attribute	Type of planting	
	Traditional	Developed
Normal Seedlings		
1.1 Seed germination rate	41	56
1.2 Percentage (%)	68.33	93.33
Dead Seeds	19	4
Height after planting 10 days(cm)	4.2	6.5

ผลการเปรียบเทียบจาก Table 4 พบว่าต้นกล้าเมล่อนที่อนุบาลปลูกด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการงอกจำนวน 56 ต้น มีเมล็ดตาย 4 ต้น คิดเป็นร้อยละ 93.33 เมื่อเทียบกับการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิมที่มีอัตราการงอกเพียง 41 ต้น มีเมล็ดตาย 19 ต้น คิดเป็นร้อยละ 68.33 และเมื่อเปรียบเทียบด้านความสูงของต้นกล้า หลังจากอนุบาลปลูกผ่านมาเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าความสูงของต้นกล้าที่อนุบาลปลูกด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น มีความสูงเฉลี่ย 6.5 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.76 แสดงการเจริญเติบโตของต้นกล้าเมล่อน (Figure 21 - 22) และแสดงผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นกล้า เมล่อนหลังย้ายลงปลูกในโรงเรือนหลัก (Figure 23)



Figure 21 Melon seedlings controlled by the developed system



Figure 22 Complete melon seedlings before being transferred to the greenhouse

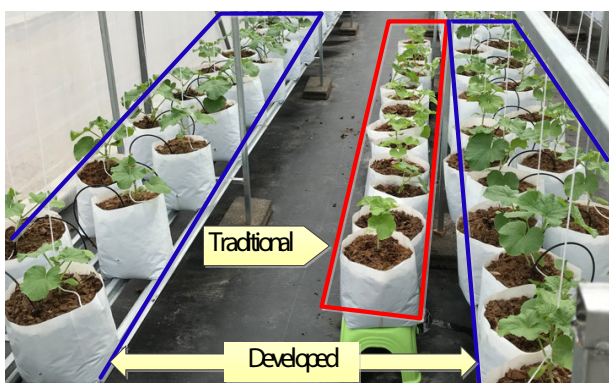


Figure 23 Compare the growth of seedlings planted in greenhouse on April 2, 2023

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสร้างระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับอนุบาลต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมนในโรงเรือนบนแพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง และเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมให้มีความ

เหมาะสมสำหรับการอนุบาลปลูก การออกแบบจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนได้แก่ 1) การออกแบบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้า 2) การออกแบบวงจรและชุดควบคุม 3) การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ 4) การออกแบบผังงาน และ 5) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดำเนินการมาโดยจะแบ่งขั้นตอนดังนี้ 1) การติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ 2) การวัดทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ 3) การแสดงผลส่วนติดต่อผู้ใช้งาน 4) การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เอ็ดฟุต 5) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน และ 6) การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตอัตราการรอดของต้นกล้าเทียบกับอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิม ในส่วนของผลการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ที่ทดสอบจะประกอบไปด้วยค่าอุณหภูมิอากาศ และค่าความชื้นในดิน ซึ่งผลการทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิในอากาศที่ใช้กับระบบควบคุมในครั้งนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.62 และเมื่อนำผลการวัดมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการวัดเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.998 ในส่วนของ การทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าความชื้นในดิน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.56 และเมื่อนำผลการวัดมาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าการวัดเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานกับเซนเซอร์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 แสดงว่าเซนเซอร์ทั้งสองมีผลการวัดที่ใกล้เคียงกับเครื่องวัดมาตรฐานและอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อทดสอบการควบคุมอุปกรณ์เอ็ดฟุต พบว่าส่วนติดต่อผู้ใช้งานทั้ง 2 ส่วนสามารถควบคุมการทำงานทั้งแบบปกติและแบบอัตโนมัติได้อย่างแม่นยำ มีความถูกต้อง คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 100 ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน ในด้านการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นกล้า พบว่าต้นกล้าที่อนุบาลปลูกด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการรอดจำนวน 56 ต้น มีเมล็ดตาย 4 ต้น คิดเป็นร้อยละ 93.33 เมื่อเทียบกับการอนุบาลปลูกแบบดั้งเดิมที่มีอัตราการรอดเพียง 41 ต้น มีเมล็ดตาย 19 ต้น คิดเป็นร้อยละ 68.33 และเมื่อเปรียบเทียบด้านความสูงของต้นกล้า หลังจากอนุบาลปลูกผ่านมาเป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าความสูงของต้นกล้าที่อนุบาลปลูกด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น มีความสูงเฉลี่ย 6.5 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิมมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.76 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกันตภณ มะหาหมัด และสหพงศ์ สมวงศ์ ที่ใช้ระบบอัจฉริยะควบคุมการเจริญเติบโตส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความสมบูรณ์กว่าการเพาะปลูกแบบดั้งเดิม จึง

สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มอัตราการออกของต้นกล้าเมล่อนญี่ปุ่นสายพันธุ์ออเรนจ์แมน และยังสามารถอำนวยความสะดวกให้แก่เกษตรกร ลดภาระในการดูแล ลดการสิ้นเปลืองทรัพยากร เพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร และลดความเสี่ยงต่อความเสียหายในการปลูกพืชให้ตรงตามมาตรฐานที่ตลาดต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณสถานที่ในการทดลอง ออร์แกนิก คอมพลีท ฟาร์ม ต.โคกม่วง อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา ที่ให้การสนับสนุนในการติดตั้งเครื่องมือวิจัยที่พัฒนาขึ้นในครั้งนี้ และขอบคุณนักศึกษาสาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ที่ช่วยเหลือติดตั้งเครื่องมือวิจัยและประกอบโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กันตภณ มะหามัต, ศรีวรรณ ขำตรี, สุวลี ชูวานิชย์. (2022). การประยุกต์ใช้ระบบสมาร์ทฟาร์มสำหรับการผลิตเห็ดแคร้ง. วารสารวิชาการปทุมวัน *Pathumwan Academic Journal*, (33), 56-74.
- นิพนธ์ พัวพงศกร, กัมพล ปันตะแก้ว และณัฐธิดา วิวัฒนวิธา. (2563). นโยบายเทคโนโลยีการเกษตร 4.0. สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย.
- ภาวิณี เหลืองประเสริฐ, วันวิสา กริมรัมย์, สุพรรณิ คาฟูย, เลิศภูมิ จันทระเพ็ญกุล (2562). ผลการใช้อุณหภูมิและฮอร์โมนเร่งรากต่ออัตราการงอกเมล็ดออร์เรนจ์เมล่อนและกรีนเน็ตเมล่อน.
- ลัญญกร นิลรัตน์, ศรีณย์ ณรงค์กุล, สมศักดิ์ อรรถกิตติมากุล. (2023). การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ควบคุมอัจฉริยะต้นทุนต่ำสำหรับโรงเรือนเพาะปลูก. การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 15 (pp.343-347).
- ศุภิศรา อภิตติกร, ศิริษฐ์สพล หนูพรหม, ศุจิรัตน์สร ประสิทธิ์. (2020). การเจริญเติบโตและผลผลิตของเมล่อน 4 พันธุ์ที่ปลูกภายใต้โรงเรือนในจังหวัดสงขลา. *Thai Science and Technology Journal*, 1450-1461.
- สหพงศ์ สมวงศ์, ฐานวิทย์ แนนไส, อธิโรจน์ มะโน. (2022). การพัฒนาโรงเรือนอนุบาลต้นกล้าอัจฉริยะสำหรับการอนุบาลปลูกแบบเกษตรอินทรีย์ วิสาหกิจชุมชน ต.ท่าข้าม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา. *Ladkrabang Engineering Journal*, 39.

อัคคพล เสนาณรงค์. (2563). โรงเรือนอัจฉริยะ. น.ส.พ. *กสิกร*, 93 (5) ,29-32.

- Akkas, M. A., & Sokullu, R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 113, 603–608.
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of internet of things (IoT) and data analytics in agriculture: benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5, 3758–3773.
- Dagar, R., Som, S., & Khatri, S. K. (2018). Smart Farming – IoT in Agriculture. *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 1052–1056

การผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากความร้อนทิ้งของเตาปิ้งย่าง

Thermoelectricity from a grill stove's waste heat

สุรจิตร พรหมเมือง

Surajitr Pramuang

Received: 20 July 2023 ; Revised: 25 September 2023 ; Accepted: 18 October 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้สร้างเตาปิ้งย่างรูปร่างทรงกระบอกผ่าครึ่ง ขนาดกว้าง 46 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร วางบนขาตั้งสูง 90 เซนติเมตร ผนังเตาทำจากเหล็กแผ่น 2 แผ่น ขึ้นรูปโค้งทรงกระบอก ระหว่างแผ่นบุฉนวนกันความร้อนหนา 4.6 เซนติเมตร นำความร้อนจากเตาถ่ายโอนให้กับแผ่นเพลเทียร์ชนิดกึ่งนำไฟฟ้า รหัส SP1848 SA-27145 จำนวน 1 2 4 และ 10 แผ่น โดยมีการต่อแผ่นเพลเทียร์เป็นวงจรอนุกรมและวงจรขนาน สำหรับจำนวน 4 และ 10 แผ่น ทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ของแต่ละโมดูลจากผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น พบว่า โมดูล 4 แผ่น ที่มีการต่ออนุกรม 2 แผ่นแล้ว นำมาต่อขนานกัน จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.9 วัตต์ เป็นผลมาจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ส่วนโมดูล 10 แผ่นจะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 10 วัตต์ และได้ประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 4.3 ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโหลดที่ต้องการปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่สูงมากนักได้

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนที่สูญเสีย, เทอร์โมอิเล็กทริก, เตาปิ้งย่าง, การถ่ายโอนความร้อน

Abstract

This study constructed a charcoal grill stove with the half-cylinder shape (46 cm width, 80 cm length and 90 cm height). The stove was made from 2 iron sheets fabricated into a curving cylinder with 2 layers, the space between the cylinders was stuffed with heat insulation 4.6 cm thick. Electricity was the conductive heat transfer using thermoelectric generator TEG SP1848SA-27145. A number of Peltiers were used for 1, 2, 4 and 10 modules connecting in a series circuit and then a parallel circuit of 4 and 10 modules. Measurements of voltage and current of each module due to its temperature difference between the hot side and cool side were performed. It was found that for the 4-pieces module, that 2 pieces in series and 2 pieces in parallel connection resulted in the maximum power of 0.9 W according to the homogenous temperature gradient, while the 10-pieces module generated the maximum power of 10 W. The average generation efficiency was 4.3% and the electricity obtained in these modules was enough for supplying low current loads demand.

Keywords: Electricity from heat wasted, thermoelectric, charcoal grill stove, heat transfer

บทนำ

เตาปิ้งย่าง มีการใช้งานทั้งในครัวเรือนและการขายอาหาร การนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จากพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากเตาปิ้งย่าง และเตาหุงแก๊สหุงต้ม ซึ่งเป็นพลังงานเหลือทิ้งกลับมาผลิตไฟฟ้าอาศัยระบบเทอร์โมอิเล็กทริก จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพื่อประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้ง

โดยการออกแบบเตาปิ้งย่างและการต่อวงจรไฟฟ้าของแผ่นเพลเทียร์ ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับโหลดไฟฟ้าให้แสงสว่างหรือพัดลม การนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตต่าง ๆ กลับมาใช้ใหม่ทั้งในรูปแบบการอบแห้งและการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งระดับอุตสาหกรรมและระดับครัวเรือน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง

ดังกล่าว โดยการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่น ทั้งการนำไปใช้เพื่อผลิตความร้อน หรือผลิตความเย็น เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปสู่ระบบเทอร์โมอิเล็กทริก และในทางกลับกันให้ให้ความร้อนและความเย็นคนละด้านของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ก็จะผลิตไฟฟ้าออกมา ที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้ โดยเฉพาะการนำไปใช้งานในแหล่งทุรกันดารที่ไม่มีไฟฟ้า ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกออกมาวางขายหลากหลายขนาดและรูปแบบ รู้จักกันดีในชื่อ แผ่นเพลเทียร์ (Peltier)

การศึกษากระบวนการนำความร้อนที่เหลือทิ้งจากน้ำร้อนในหม้อต้มน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งตามปกติมีการปล่อยน้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียส ออกไปโดยเปล่าประโยชน์ ได้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก โดยไพบูลย์ โกวิทย์เจริญกุล (2560) สร้างชุดกำเนิดไฟฟ้าจากแผ่นเพลเทียร์ จำนวน 4 ชุด ๆ ละ 96 ตัว อาศัยน้ำร้อนเหลือทิ้ง ทำงานโดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีน้ำร้อนและน้ำเย็นไหลผ่านแต่ละด้านของแผ่นเพลเทียร์ที่ต่อกันแบบผสม สามารถผลิตไฟฟ้าได้แรงดันไฟฟ้าวจรเปิด 250 โวลต์ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 1.2 แอมแปร์ มีการแปลงความร้อนเป็นไฟฟ้าได้เพียงร้อยละ 0.42 เมื่อคำนวณต้นทุนการผลิตจึงพบว่าต้นทุน 2,500 บาท/วัตต์ ซึ่งสูงกว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงชนิดอื่นค่อนข้างมาก การที่จะให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น อาจจำเป็นต้องใช้เทคนิคการป้องกันความร้อนให้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกแบบเป็นคาบเวลา ที่พบว่าช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 32.8 - 57.0% เมื่อจากความร้อนเป็นคาบเวลา 100 - 1000 วินาที (ปิยพัฒน์ พานเมือง, 2559) สำหรับพีรวัฒน์ มีสุข (2560) ได้ทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกจากแผ่นเพลเทียร์ TEC1 12706 จำนวน 6 โมดูลต่อกันรวมกัน ที่มีผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ได้แรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด 11.2 โวลต์ และเมื่อมีโหลดจะได้แรงดันไฟฟ้า 3.1 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 152.6 มิลลิแอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 476.1 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของเตาหุงต้มเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียม (LPG) โดยศุภกิจ บุตรน้ำเพชร (2560) ทดลองกับเตาแก๊สปิคนิค สร้างแผ่นสังกะสีครอบกันลมพร้อมกับติดแผ่นเพลเทียร์ TEHP-1 -12635-1.2 จำนวน 4 โมดูล เป็นระบบผลิตไฟฟ้าใช้พัฒลมเป่าแผ่นเพลเทียร์ด้านเย็นด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.0191 - 0.0281 กิโลกรัม/วินาที พร้อมกับติดครีประบายความร้อน ซึ่งมีผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนกับด้านเย็นเฉลี่ย 185 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ไฟฟ้าสูงสุด 11.2 วัตต์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของเตาปิ้งย่าง ด้วยแผ่นเพลเทียร์ วิเคราะห์แนวทาง

ในการประยุกต์ใช้ไฟฟ้างกล่าว ตามจำนวนแผ่นและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สำหรับการใช้งาน ต่อไป

สมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดประจุลบ (N type) และชนิดประจุบวก (P type) ซึ่งสามารถเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้า และเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ ทำจากวัสดุผสมของธาตุหลายชนิด เช่นสารผสมของบิสมัท - เทลลูไรด์ ตะกั่ว - เทลลูไรด์ สังกะสี - ดีบุก และซิลิกอน - แกลเลียม เป็นต้น การสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดคู่ พี - เอ็น มาต่อกันเป็นเมทริกซ์หลาย ๆ อัน เป็นชั้น ๆ เพื่อให้สามารถทำงานได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนไฟฟ้าให้เป็นความร้อน หรือเปลี่ยนความร้อนให้เป็นไฟฟ้า ได้สูงตามไปด้วย โดยทั่วไปแบ่งเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ออกเป็น 3 กลุ่มตามอุณหภูมิของการทำงาน ได้แก่ กลุ่มที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ จนถึงอุณหภูมิห้องตามสภาพแวดล้อมปกติ ตั้งแต่ 180 - 450 เคลวิน วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เช่น Bi_2Te_3 , CsBi_4Te_6 เป็นต้น เป็นกลุ่มที่นิยมนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานในสภาพแวดล้อมทั่วไปได้ กลุ่มที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิปานกลางระหว่าง 400 - 800 เคลวิน เหมาะสมกับการใช้งานผลิตไฟฟ้า หรือระบบหล่อเย็นในอุตสาหกรรมที่มีความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิสูง วัสดุที่นำมาใช้เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เช่น PbTe , Pb-Sn-Te , TAGS เป็นต้น และกลุ่มที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 900 เคลวินขึ้นไป เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า โรงงานเหล็ก หรือผลิตไฟฟ้าในอวกาศ วัสดุที่นำมาใช้เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เช่น Si-Ge , เป็นต้น

คุณสมบัติที่บ่งบอกสมรรถนะของการทำงานสำหรับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก จะถูกกำหนดด้วยค่าความสามารถ หรือค่า Figure of Merit (Z) ซึ่งเป็นค่าสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S) และอุณหภูมิ (T) โดยค่า Z ที่สูง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลสูงขึ้นไปด้วย ดังสมการ (Snyder & Snyder, 2017)

$$ZT = \frac{\sigma S^2 T}{K} = \frac{S^2 T}{\rho K} \quad (1)$$

เมื่อ σ เป็นสภาพนำไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร)⁻¹ K เป็นค่าการนำความร้อน (วัตต์/เมตร-เคลวิน) และ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เมตร) อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ผลิตจำหน่าย จะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพี-เอ็น มาจัดเรียงบน

ฉนวนไฟฟ้าที่เป็นเซรามิกส์ แต่ละชั้นจะต่อกันแบบอนุกรมและแบบขนาน ทำให้เกิดเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic junction) ที่ผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็น มีโครงสร้างภายในดัง Figure 1

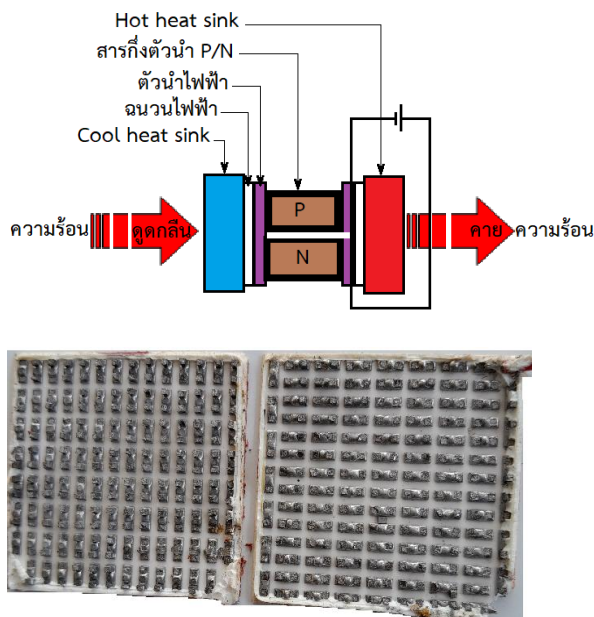


Figure 1 The structure of peltier type Bismuth-Telluride (Bi_2Te_3)

การผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชนิดผลิตไฟฟ้า (Thermoelectric generator, TEG) จะเป็นไปตามปรากฏการณ์ซีเบค เมื่อประจุพาหะได้รับพลังงานด้านร้อน ประจุพาหะจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าด้านเย็น ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อน-เย็น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกับการไหลความร้อนจากด้านร้อนไปยังด้านเย็น ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิ ในทางปฏิบัติจะมีแผ่นระบายความร้อน (Heat sink) ติดไว้ทั้งสองด้านเพื่อให้เกิดการระบายความร้อน เมื่อผลต่างอุณหภูมิลดลง กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรก็จะลดลงในทางทฤษฎีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิตไฟฟ้า (η_{TEG}) จะคำนวณได้จากผลต่างของอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Z) ตามสมการ (Snyder & Snyder, 2017)

$$\eta_{\text{TEG}} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2)$$

เมื่อ T_h และ T_c เป็นอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น (เคลวิน) ตามลำดับ T เป็นอุณหภูมิเฉลี่ย (เคลวิน)
การถ่ายโอนความร้อนในเตาปิ้งย่าง

การถ่ายโอนความร้อนของเตาปิ้งย่าง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นด้านบน เป็นการพาความร้อน จากไอร้อนที่พุ่งขึ้นจากล่างขึ้นบน ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อน (Figure 2) ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนขึ้นด้านบนจะสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ในการปิ้งย่าง สำหรับการถ่ายโอนด้านข้างและด้านล่าง จะเป็นการนำความร้อนปริมาณความร้อนในการถ่ายโอนด้านข้าง จะแปรผันกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำผนัง และความหนาของวัสดุเป็นความร้อนที่สูญเสียไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องลดปริมาณการนำความร้อนบริเวณด้านข้างและด้านล่าง โดยการใช้อฉนวนกันความร้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำหรือใช้วัสดุผนังเตาที่มีความหนามากขึ้น

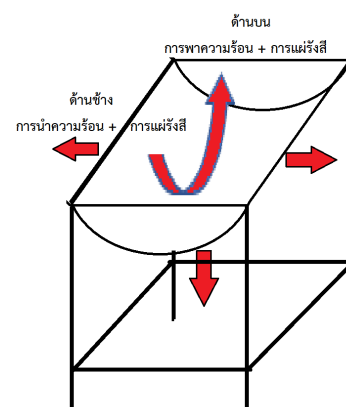


Figure 2 Heat transfer in the grill stove

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ได้สร้างเตาปิ้งย่าง รูปร่างทรงกระบอกผ่าครึ่ง กว้าง 46 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร ขาตั้งโครงเหล็กสูง 90 เซนติเมตร ผนังเตาทำจากเหล็กแผ่น 2 แผ่น ขึ้นรูปโค้งแผ่นนอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร แผ่นด้านในเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ระหว่างแผ่นบุฉนวนกันความร้อนหนา 4.6 เซนติเมตร ด้านข้างติดตั้งแผ่นเหล็กขนาดความกว้าง 20 x 20 เซนติเมตร สำหรับวางชุดโมดูลแผ่นเพลเทียร์ (Figure 3)



Figure 3 A grill stove constructed

การทดลองผลิตไฟฟ้า โดยติดตั้งแผ่นเพลเทียร์ TEG รหัส SP1848 SA-27145 จำนวน 1 2 4 และ 10 แผ่น บนแผ่นเหล็ก ต่อแผ่นเพลเทียร์แบบอนุกรม และแบบขนานสำหรับชุด 4 (ต่ออนุกรม 2 แผ่นแล้วมาต่อขนานกัน) และ 10 แผ่น (ต่ออนุกรม 5 แผ่นแล้วนำมาต่อขนานกัน) ด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์จะติดแผ่นระบายความร้อน ส่วนด้านร้อนจะติดกับแผ่นเหล็กแล้วประกบติดข้างเตา เมื่อเตาติดไฟอย่างทั่วถึงแล้ว จะวางแผ่นเหล็กที่ติดตั้งชุดแผ่นเพลเทียร์กับผ้งเตาปิ้งย่าง (ลูกศรชี้) วัดอุณหภูมิด้านร้อน และด้านเย็น ด้วยเครื่องมือวัด

อุณหภูมิแบบเทอร์คัปเปิ้ล และ IR thermometer พร้อมกับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ด้วยมัลติมิเตอร์

ผลการวิจัย

ผลการวัดค่าอุณหภูมิ และปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผ่นเพลเทียร์ เมื่อติดตั้งแผ่นเพลเทียร์ 1 2 4 และ 10 แผ่น ได้ค่าอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น ความต่างศักย์ไฟฟ้า วงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าวงจรเปิด วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลต่างอุณหภูมิ กับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงใน Figure 4 - 7 ตามลำดับ

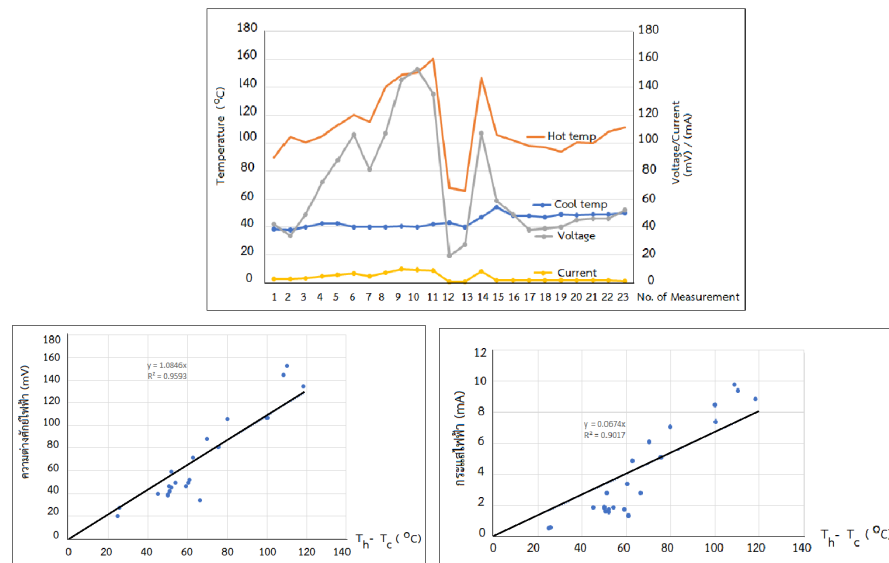


Figure 4 Temperature, voltage and current obtained for 1 peltier, and regression analysis of voltage and current due to temperature difference

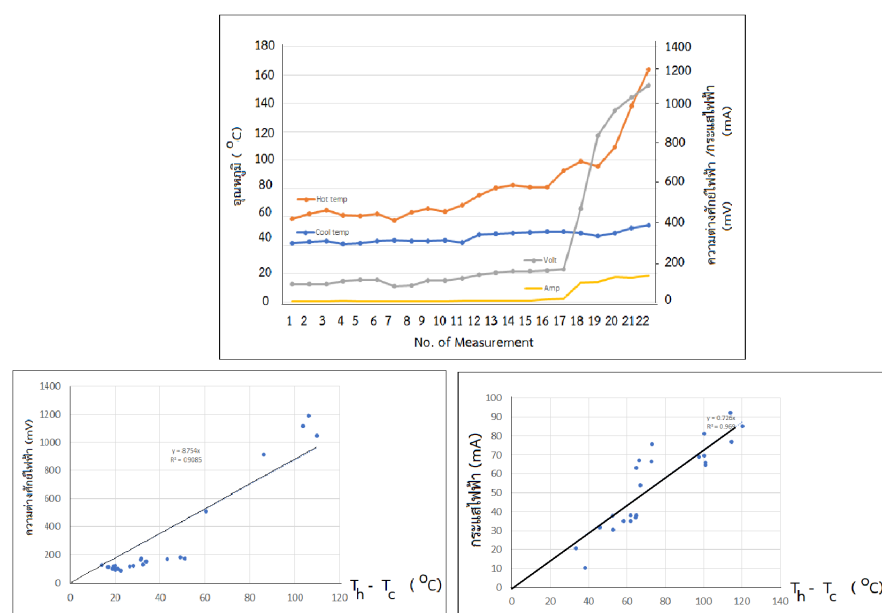


Figure 5 Temperature, voltage and current obtained for 2 peltiers, and regression analysis of voltage and current due to temperature difference

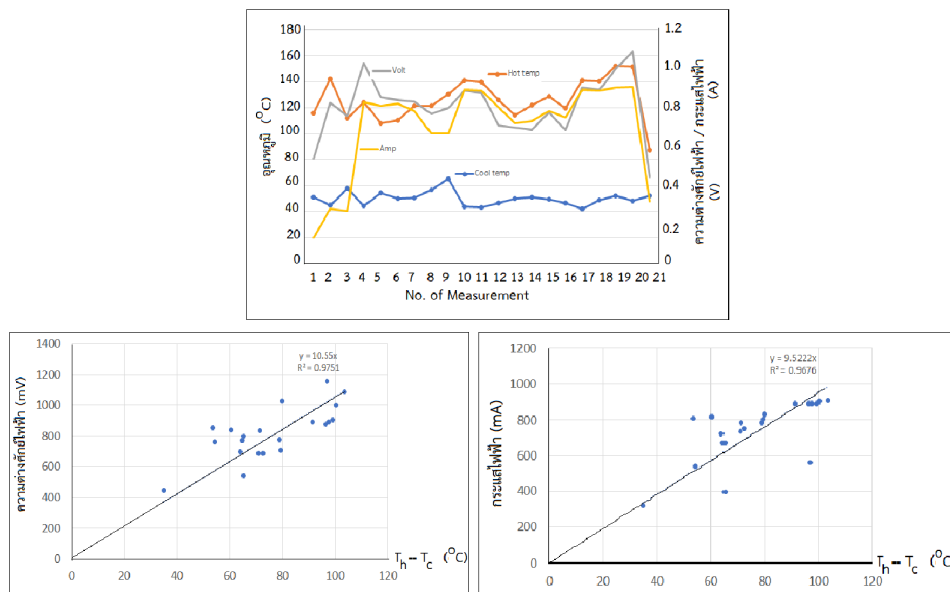


Figure 6 Temperature, voltage and current obtained for 4 peltiers, and regression analysis of voltage and current due to temperature difference

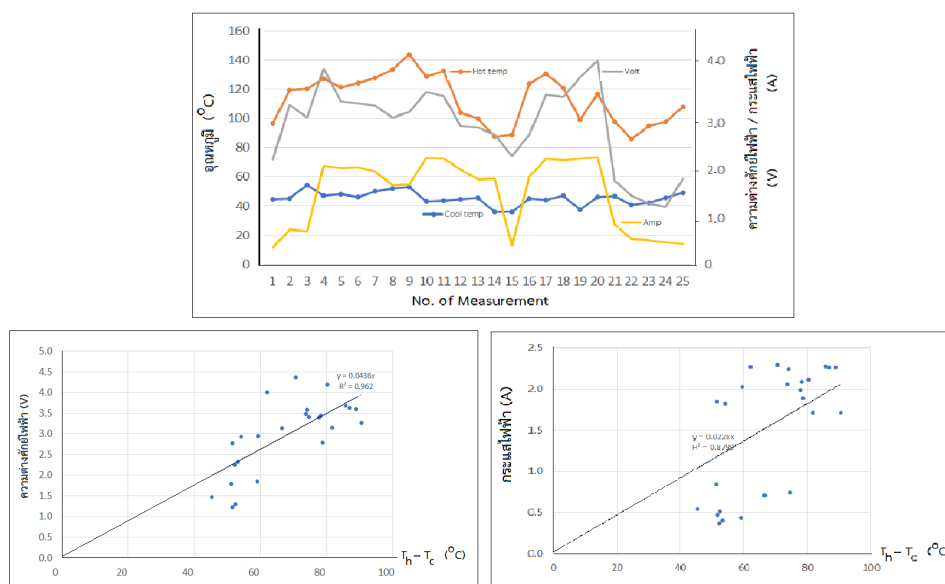


Figure 7 Temperature, voltage and current obtained for 10 peltiers, and regression analysis of voltage and current due to temperature difference

อุณหภูมิด้านเย็นมีค่าระหว่าง 38.1 - 65.2 องศาเซลเซียส อุณหภูมิด้านร้อนมีค่าระหว่าง 65.7 - 164.0 องศาเซลเซียส กรณี 1 แผ่นผลต่างอุณหภูมิเท่ากับ 110.3 องศาเซลเซียส จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 19.7 - 153.0 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.6 - 9.8 มิลลิแอมแปร์ จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.5 มิลลิวัตต์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.4 มิลลิวัตต์ เมื่อใช้เพลเทียร์ 2 แผ่นต่อกันแบบอนุกรม ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 86.6 - 1190.0 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 3.9 - 144.5 มิลลิแอมแปร์ จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

172.0 มิลลิวัตต์ และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 22.7 มิลลิวัตต์ ผลการวัดการผลิตไฟฟ้าจากการต่อแผ่นเพลเทียร์ 4 แผ่นแบบผสม โดยอนุกรม 2 แผ่นแล้วขนาน 2 แผ่น มีผลต่างอุณหภูมิ มีค่าระหว่าง 34.9 - 109.6 องศาเซลเซียส ความต่างศักย์ไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 0.4 - 1.0 โวลต์ กระแสไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 0.2 - 0.9 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าระหว่าง 0.1 - 0.9 วัตต์ ที่อุณหภูมิด้านเย็น 48.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิด้านร้อน 151.9 องศาเซลเซียส ได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.6 วัตต์ ข้อมูลที่ได้จากเพลเทียร์ 10 แผ่นที่ต่ออนุกรม 5 แผ่นแล้วนำมาต่อขนานกัน ความ

ต่างศักย์ไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 1.2 - 4.0 โวลต์ กระแสไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 0.4 - 2.5 แอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าระหว่าง 0.8 - 10.0 วัตต์ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 5.0 วัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จะเป็นแบบเชิงเส้น มีค่าความชันของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้า สูงกว่าค่าความชันของกราฟกระแสไฟฟ้า แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ด้านร้อนและด้านเย็นส่งผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า มากกว่ากระแสไฟฟ้า

ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Z) ของแผ่นเพลเทียร์ วิเคราะห์ได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าใน Figure 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 7.31×10^{-5} วัตต์/เคลวิน สูงกว่าค่าจากผู้ผลิตที่มีค่าระหว่าง $2.5 - 3.0 \times 10^{-5}$ วัตต์/เคลวิน ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จะได้ผลดัง Table 1

Table 1 The electricity efficiency of thermoelectric module by peltier modules

Number of Peltier plates	Lowest value (%)	Maximum value (%)	Mean (%)
1	2.57	6.89	4.43
2	2.99	3.62	3.27
4	4.72	6.82	5.82
10	3.62	4.64	4.08

สรุปผลการวิจัย

การสร้างเตาปิ้งย่างที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ใช้ความร้อนทั้งจากการปิ้งย่างไปผลิตไฟฟ้าจากแผ่นเพลเทียร์ชนิดผลิตไฟฟ้า รหัส SP1848 SA-27145 ในโมดูล 1 แผ่น ผลิตไฟฟ้าได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 153.0 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 9.8 มิลลิแอมแปร์ ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.5 มิลลิวัตต์ ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 44.8 - 118.4 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ 2 แผ่นต่ออนุกรม ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1190.0 มิลลิโวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 144.5 มิลลิแอมแปร์ ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.2 วัตต์ ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 33.5 - 120.4 องศาเซลเซียส กรณี 4 แผ่นต่ออนุกรม แล้วต่อขนาน ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1.0 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 0.9 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.9 วัตต์ ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 34.9 - 103.6 องศาเซลเซียส และกรณี 10 แผ่นต่ออนุกรม 5 แผ่นแล้วขนาน ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 4.0 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 2.5 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 10.0 วัตต์ ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ 45.3 - 90.7 องศาเซลเซียส สำหรับประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทั้งของเตาปิ้งย่าง มีค่าสูงสุดร้อยละ 6.89 ค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.3 สรุปได้ว่า ความร้อนทั้งจากเตาปิ้งย่างสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าไม่สูงมากได้ เช่น หลอดแอลอีดี หรือการอัดประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

อภิปรายผลการวิจัย

อุณหภูมิของผนังเตาปิ้งย่างเมื่อใช้งาน มีค่าสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส เกินขีดจำกัดของแผ่นเพลเทียร์ชนิดบิสมัท-เทลลูไรด์ (Bi_2Te_3) มีอุณหภูมิสูงสุดในการทำงานประมาณ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผนังเตาปิ้งย่าง และมีการนำความร้อนภายในแผ่นเพลเทียร์จากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็น การระบายความร้อนทางด้านเย็นออกไปไม่ทัน ทำให้ผลต่างอุณหภูมิมีค่าลดลงตามอุณหภูมิด้านร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลลดลง ถ้ามีการระบายความร้อนด้านเย็นให้มีอุณหภูมิคงตัวตลอดเวลา อาจใช้เป็นตัวระบายความร้อน หรือการใช้พัดลมช่วยระบายความร้อน จะช่วยรักษาเสถียรภาพในการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล มีอุณหภูมิสูงกว่ามาก ทำให้แผ่นเพลเทียร์เกิดการชำรุดได้ง่าย จำเป็นต้องออกแบบจุดติดตั้งแผ่นเพลเทียร์ให้มีช่องว่างกับผนังเตาในระนาบที่เหมาะสม หรือการหาจุดที่มีอุณหภูมิเหมาะสม ในการติดตั้งแผ่นเพลเทียร์ เพื่อให้ผลต่างอุณหภูมิเหมาะสมกับชนิดของแผ่นเพลเทียร์ที่ใช้ (มตินรารมย์ และปวิตวงศ์ บำรุงจันทร์, 2561) วิธีการเลือกชนิดเพลเทียร์กลุ่มอุณหภูมิปานกลางตามการศึกษาของ สุรัชชัย เหมหิรัญ และ ดิฐภัทร ตันประดิฐ (2560) ที่ได้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกกลุ่มอุณหภูมิปานกลางเป็นระบบผลิตไฟฟ้า TGU ในเตาแก๊สหุงต้ม ทำให้การผลิตไฟฟ้าได้เสถียรภาพ เช่นเดียวกันกับ ชัยพล เฟ่งพิศ (2556) ที่ได้ใช้แผ่นเพลเทียร์รุ่น CR1 12706 ที่ทำงานได้ในอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตไฟฟ้าได้เสถียรมากกว่าแบบบิสมัท - เทลลูไรด์

การลุกไหม้ของถ่านในเตาไม่เท่ากัน การกระจายความร้อนบริเวณผนังเตา จึงไม่สม่ำเสมอ หรือค่าเกรเดียนท์อุณหภูมิขณะใด ๆ มีค่าไม่คงตัว ส่งผลให้แผ่นเพลเทียร์แต่ละแผ่นได้รับความร้อนไม่เท่ากัน โดยเฉพาะกรณีที่จำนวนแผ่นเพลเทียร์ 10 แผ่น ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง คล้ายกับการศึกษาของ Minghui, *et al.*, (2022) ที่พบว่าการผลิตไฟฟ้าจากจำนวนโมดูลของเทอร์โมอิเล็กทริกแตกต่างกัน มีการลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อการกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและกระแสไฟฟ้ายังไม่เสถียร ส่งผลต่อการทำงานของโหลดไฟฟ้า ในการศึกษาของคณิศร บุญรัตน์ และคณะ (2563) แก้ปัญหานี้ด้วยการเพิ่มวงจรไฟฟ้าทาบระดับแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อควบคุมให้การจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดมีค่าสม่ำเสมอ กรณีใช้เพลเทียร์ 10 แผ่น อาจต่ออนุกรม 2 แผ่น แล้วนำมาต่อวงจรขนาน 5 คู่ จะช่วยให้จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสาขาวิชาฟิสิกส์ที่สนับสนุนเครื่องมือวัดข้อมูลวิจัย และอุปกรณ์ในการวิจัย จนสำเร็จลุล่วง มา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- คณิศร บุญรัตน์ จันทรจิรา เจือกวัน และกิตติศักดิ์ ทวีสินโสภา. (2563). การเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากเตาแก๊สหุงต้มด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- ชัยพล เฟ่งพิศ. (2556) การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนที่สูญเสียจากก้นต้กไอน้ำ. [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง]. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปิยพัฒน์ พานเมือง. (2559). เทคนิคการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิคการจ่ายความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง. [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม]. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ไพบุลย์ ไกรวิทเจริญกุล. (2550). การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนเหลือทิ้งด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มติ นรารมย์ และปวิดวงศ์ บำรุงชนท์. (2561). การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาถ่าน. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มอ.บ.*, 11(2), 100 - 108.

ศุภกิจ บุตรน้ำเพชร. (2560). การพัฒนาระบบถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาหุงต้มแก๊สบีโตรเลียมเหลว [วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา]. มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.

สุรัชย์ เหมหิรัญ และ ดิฐภัทร ต้นประติฐ. (2560). การผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสูญเสียของเตาแก๊สด้วยชุดกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ*, 12(1), 92 -101.

Minghui, Ge., Zhenhua, Li., Yuntong, Zhao., Zhiwei, Xuan., Yanzhe, Li. and Yulong, Zhao. (2022). Experimental study of thermoelectric generator with different numbers of modules for waste heat recovery. *Applied Energy*, 322, (15), 119523.

Snyder, G. J. & Snyder, A. H. (2017). Figure of merit ZT of a thermoelectric device defined from materials properties. *Energy & Environmental Science*, 10 (11), 2280-2283.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับ

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

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

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

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

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

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

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

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

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

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

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

ชื่อผู้พิมพ์ [Author (s)] และที่อยู่ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงอรรถของหน้าแรก 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 ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

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

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

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

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

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

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

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฒ. (2547). หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่. ปิตติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

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

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

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

ตัวอย่าง:

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

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

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

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เติลนิสว่าไรดี: 'สื่อพิพิธภัณฑ' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต.
เติลนิส, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

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

ตัวอย่าง:

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

Instruction for Authors

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

Preparation of manuscripts:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References: listed and referred in APA.

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

1. Book

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

2. Academic Journal

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

3. Conference Proceeding

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

4. Newspaper / Online Newspaper

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

5. E-book

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

Aim and Scope:

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

Ownership

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

Advisors

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

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

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

Editorial Board

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

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

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation
and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Rungwisai
Jirarat Puseerit

Six issues per year

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

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 43 Number 4 July - August 2024

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

