



วารสาร วิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ปีที่ 44 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

Vol. 44 No. 2 July - December 2025

วารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 3027-737X (Online)



WICHCHA
NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY
JOURNAL



วารสาร วิชชา WICHCHA JOURNAL มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY

ปีที่ 44 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568 Vol. 44 No. 2 July - December 2025

เจ้าของที่ปรึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.สมปอง รักษาธรรม รักษาการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
บรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.ประวิทย์ เนื่องมัจฉา
ผู้ช่วยบรรณาธิการ ดร.เบญจวรรณ นิลวงศ์

นโยบาย

1. วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตีพิมพ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524
2. วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นเอกสารวิชาการแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเผยแพร่ให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงแบบออนไลน์ได้แบบเสรีโดยผ่านกระบวนการประเมินจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review)

ขอบเขตงาน

ขอบเขตของบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ที่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นบทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อเป็นสื่อส่งเสริมการสร้างความรู้และองค์ความรู้ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเวทีนำเสนอผลงานทางวิชาการของบุคลากรในมหาวิทยาลัยและบุคคลทั่วไป

ประเภทบทความ

วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตีพิมพ์บทความฉบับเต็มในรูปแบบบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ตามขอบเขตงาน

กระบวนการพิจารณาบทความ

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องจากหลากหลายหน่วยงาน อย่างน้อย 3 ท่าน ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review) และบทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ที่ปรากฏในวารสารที่เป็นวรรณกรรมของผู้เขียน บรรณาธิการหรือมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่เก็บค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์

เกี่ยวกับวารสาร

ชื่อวารสาร : วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ISSN ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ : 3027-737X
เว็บไซต์วารสาร : <https://www.tci-thaijo.org/index.php/wichcha/index>

กำหนดเผยแพร่ : เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

กองบรรณาธิการภายนอกมหาวิทยาลัย ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.การุณ ทองประจักษ์
ศาสตราจารย์ ดร.สมปอง เตชะโต
ศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ จันทน์ไทย
ศาสตราจารย์ ดร.สรรพสิทธิ์ กล่อมเกล้า
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรัย อินทะไชย
รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตนันท บวรณชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา เตือนฉาย
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์พิชิต จันทน์นุ้ย
รองศาสตราจารย์ ดร.ยลพัชร อารีรับ

รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย รสชาติ

รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์ ปัตตาฤทธิ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธิพันธ์ ผึ้งผาย

กองบรรณาธิการภายในมหาวิทยาลัย ประกอบด้วย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี ถาวโร

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ
คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนภา พิมเสน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุรีพร ยืนนาน

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ประเมินอิสระหรือพิชญพิจารณา (Peer review) ตรวจสอบทางวิชาการประจำปี

ศาสตราจารย์ ดร.สรรพสิทธิ์ กล่อมเกล้า

รองศาสตราจารย์ ดร.กานดา ล้อแก้วมณี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ แก้วดาปี

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา เสนีवास

รองศาสตราจารย์ ดร.เยาวพา จิระเกียรติกุล

รองศาสตราจารย์ ดร.วิกันดา รัตนพันธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุภกร บุญยืน

รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี งามสูตร

รองศาสตราจารย์ ดร.โอภาส วนิชชีวะ

รองศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.งามนิช ชื่นบุญงาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จำเนียร ชมภู

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนมภัทร ไตรระสะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ สากุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภูมิ ศิริงาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไผ่แดง ขวัญใจ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ สุขัยยะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนรงค์ มากพันธ์

คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ

คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะนวัตกรรมการเกษตร ประมง และอาหาร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยพะเยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชนิ มัธยม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพงศ์ มหาคำ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริศานติญากร บรรหาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ชัยณรงค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวลี พองอินทร์

ดร.นุชจรินทร์ เพชรเกลี้ยง

ดร.ปัทมา ทองกอก

ดร.วัชร กัลยา

ดร.วิภาวดี พันธุ์หนองหัว

ดร.วุฒิพงษ์ แบ่งใจ

ดร.สันติ ขำตรี

ผู้ตรวจทานภาษาต่างประเทศประจำฉบับ

Ms.Christine Soriano

Mr.Kenneth Ugonabo

ฝ่ายอำนวยการ ประกอบด้วย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีภรณ์ นวนมุสิก

รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ศุภพันธ์

ว่าที่ร้อยตรี ดร.จาดรนต์ ชูติธพงษ์

ดร.เบญจวรรณ นิลวงค์

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวกัณต์ฤทัย จจรังส

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยพะเยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ศูนย์ภาษาและวัฒนธรรมนานาชาติ

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ศูนย์ภาษาและวัฒนธรรมนานาชาติ

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ปก

มูฟ แอดเวอร์ไทด์ (Moof Advertise)

เลขที่ 1/13 หมู่ที่ 6 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

โทร. 095-7218863 / 093-6623225 e-mail: moofadvertise@gmail.com

	หน้า
บทความวิจัย	
การลดต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากวัสดุเหลือทิ้งของการเพาะเห็ดแครง โดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม ชาตรี หอมเขียว* นศพร ธรรมโชติ วรพงศ์ บุญช่วยแทน ชินานาง นิลรัตน์ และมนิรัตน์ แก้วโคกหาวาย	1
ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดิน ภูมิพัฒน์ คำคำ	17
การทดสอบคุณภาพผ้าสีธรรมชาติที่ย้อมด้วยสีผงจากเปลือกฝักโกโก้ (<i>Theobroma cacao</i>) โดยการใช้สารช่วยติดสี จุติพร อัสวโสวรรณ วีระเกียรติ ทรัพย์มี และจุฑามาศ ศุภพันธ์*	30
การศึกษาระยะของช่องว่างในถังหมักที่ส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารพืช นันทวัน หัตถมาศ* ลัดดาวัลย์ จำปา และนัฐพงษ์ ทองปาน	44
การเปรียบเทียบความคงตัวของสีเขียวและคุณภาพของหลอดขงสิงคโปร์ที่ทำจากใบเตย (<i>Pandan amaryllifolius</i> Roxb.) โดยใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตและน้ำปูนใส สรสนีย์ เต็มเปี่ยม วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์ คันสนีย์ ทิมทอง และศุภักษร มาแสวง*	58
การขยายพันธุ์กล้วยนาถ (<i>Musa acuminata</i> cv Red Dacca) ในหลอดทดลอง ราตรี นิตยเดชพัฒน์* และพรศรี ชื่นชม	73
การศึกษาโปรไฟล์และความสัมพันธ์ของสารเมแทบอลิไตในสาหร่ายทะเล <i>Sargassum polycystum</i> <i>Caulerpa lentillifera</i> และ <i>Gracillaria fisheri</i> อรัชพร ทองโอฬาร ทิวธวัฒน์ นาพิรุณ และสุเปญญา จิตตพันธ์*	87
การประเมินความหลากหลาย ปริมาณสารอาหาร และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้านในเมนูขนมจีน เมืองนครศรีธรรมราช ประเทศไทย นฤมล มีบุญ เยาวมาลย์ เขียวสอาด สมพร เรืองอ่อน สมรักษ์ รอดเจริญ และสิริลักษณ์ สันธุพาชี*	102
การประเมินสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์โบรมีเลนจากสับปะรดภูเก็ต เขาวนิพร ชีพประสพ* จิรภา คงเขียว และกนิษฐา พงศ์อาทิตย์	121
ศักยภาพของหนอนแมลงวันลายในการเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่นในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มข้นของปลาแพนซีคาร์ป วรรณัย ศรีศักดิ์ดา บุญพริกา ทองดอนพุ่ม พชรธร สิมกึ่ง และกิตติมา วานิชกุล*	136
คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ	150

การลดต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากวัสดุเหลือทิ้งของ
การเพาะเห็ดแครงโดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม
Reducing the Production Costs of Pots from Wastes in Cockle
Mushroom Cultivation Using Industrial Engineering Techniques

ชาตรี หอมเขียว^{1*} นศพร ธรรมโชติ² วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹

ชินานาง นิรัตน์¹ และมนิรัตน์ แก้วโคกหวาย¹

Chatree Homkhiew^{1*}, Nasaporn Thammachot², Worapong Boonchouytan¹,
Chinanang Ninrat¹ and Maneerat Keawkokvai¹

บทคัดย่อ

ก่อนเชื้อเห็ดแครงหลังการเพาะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นกระถางเพาะกล้าไม้ได้ อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยในกระบวนการผลิตนั้นมีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ให้ต้นทุนการผลิตลดลง โดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในการดำเนินงานวิจัยมีการประยุกต์ใช้แผนภูมิกระบวนการทำงาน แผนภูมิกระบวนการไหล แนวคิดการลดความสูญเสีย และการคำนวณต้นทุนการผลิต ซึ่งผลจากการดำเนินงานพบว่า สามารถลดกระบวนการผลิตที่ไม่จำเป็น ลดระยะเวลาการทำงาน ลดระยะเวลาการรอคอย และลดการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นได้ ขณะเดียวกัน ในการปรับปรุงสูตรส่วนผสมการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ ได้ลดปริมาณการใช้วัตถุดิบที่มีราคาสูง เช่น แป้งมันสำปะหลัง และน้ำมันพืชที่ใช้เคลือบแม่พิมพ์ ซึ่งจากการลดปริมาณการใช้วัตถุดิบทั้งสองนี้ พบว่ากระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ผลิตจากซีลี้อยไม้ 100 กรัม แป้งมันสำปะหลัง 100 กรัมต่อน้ำ 300 มิลลิลิตร และไม้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป มีค่าแรงอัดในแนวตั้ง 1,780 นิวตัน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ 36.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่ากระถางก่อนการปรับปรุงสูตร ดังนั้นผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตและสูตรส่วนผสมดังกล่าว สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 31.8 เปอร์เซ็นต์ โดยก่อนการปรับปรุงมีต้นทุนการผลิต 9.68 บาทต่อใบ และหลังการปรับปรุงมีต้นทุนการผลิต 6.60 บาทต่อใบ

คำสำคัญ: กระถาง ซีลี้อยไม้ยางพารา การลดต้นทุนการผลิต การลดความสูญเสีย ก่อนเชื้อเห็ดแครง

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* Corresponding author e-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.263404>

Received: 19 May 2024, Revised: 18 September 2024, Accepted: 25 September 2024

Abstract

Cockle mushroom lumps remaining after cultivation are waste materials that can be developed into pots; however, the production processes involve high costs. Thus, the objective of this research was to reduce the production costs of pots made from cockle mushroom cultivation waste using industrial engineering techniques. An operation process chart, flow process chart, waste reduction concepts, and production costs calculations were applied in this study. The results showed that unnecessary processes, working time, waiting time, and unnecessary movement could be reduced. At the same time, the ingredient formulation for pot production was improved by reducing the amount of high-priced raw materials, such as cassava starch, and eliminating the use of vegetable oil for coating molds. With the improved formulation comprising 100 grams of sawdust, 100 grams of cassava starch, and 300 milliliters of water without vegetable oil coating, the pots exhibited better vertical compressive strength (1,780 N) and lower water absorption (36.33%) compared to those produced with the original formulation. As a result of both the improved production process and the revised ingredient formulation, production costs were reduced by approximately 31.8%, decreasing from 9.68 baht per piece to 6.60 baht per piece.

Keywords: Pot, Rubberwood sawdust, Reducing production costs, Reducing waste, Cockle mushroom lump

บทนำ

ก้อนเห็ดक्रमหมดเชื้อเห็ดจากการเพาะ ซึ่งมีเชื้อเลื้อยไม้เป็นส่วนผสมหลักส่วนใหญ่จะกำจัดโดยการกองรวมกันในสวนยางพาราเพื่อให้เกิดการย่อยสลายไปเองตามธรรมชาติหรือการเผาทำลาย ดังภาพที่ 1 การกำจัดด้วยวิธีเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษทางอากาศจากการหมักหมม เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์มีพิษ และไม่เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้ง ดังนั้นงานวิจัยของชาติรี และคณะ (2566) จึงนำเชื้อเลื้อยไม้ที่อยู่ในก้อนเห็ดक्रमมาพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์กระถางเพาะกล้าไม้ โดยพบว่ากระถางเพาะกล้าไม้ที่ผลิตจากเชื้อเลื้อยไม้ 120 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 150 กรัมต่อน้ำครึ่งลิตร มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตกระถางเพาะกล้าไม้มากที่สุด

ในปัจจุบันกระถางเพาะกล้าไม้จากวัสดุเหลือทิ้งการเพาะเห็ดक्रमมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง ทำให้ความสามารถในการแข่งขันต่ำเมื่อเทียบกับกระถางจากวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นการศึกษาหาแนวทางการปรับปรุงเพื่อลดต้นทุนผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นและต้องดำเนินการโดยเร่งด่วน เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและเพิ่มโอกาสทางการตลาด ซึ่งการศึกษาหาแนวทางการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์มีการดำเนินการอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างงานวิจัยของสาวิตรี (2564) ลดความสูญเสียเปล่าจากการทำงานที่ไม่จำเป็นในกระบวนการผลิตน้ำมะนาวบรรจุขวดพลาสติก ทำให้ประสิทธิภาพการ

ทำงานเพิ่มขึ้น โดยต้นทุนการดำเนินงานจากเดิม 4,035 บาท เหลือ 2,268.75 บาท ทำให้ลดต้นทุนไปได้เท่ากับ 1,970.17 บาทต่อวัน หรือ 689,559.50 บาทต่อปี ซึ่งประหยัดต้นทุนได้คิดเป็น 43.50 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยของถลัน (2560) ปรับปรุงกระบวนการดำเนินงานเพื่อลดต้นทุนคลังบรรจุภัณฑ์สินค้า โดยใช้หลักการปรับปรุงงาน 4 ขั้นตอน (eliminate combine rearrange simplify: ECRS) คือ การกำจัด การรวมกัน การจัดใหม่ และการทำให้ง่าย ซึ่งการใช้พลาสติกกันกระแทกแทนกระดาษกันกระแทกในการป้องกันสินค้าแตกหักเสียหาย และยังเป็นการประหยัดเวลาในการออกแบบและสั่งผลิต ทำให้สามารถลดต้นทุนได้ 375,442.59 บาท คิดเป็น 66.00 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยของเตชิต (2564) ลดต้นทุนกระบวนการขนส่งในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีในจังหวัดระยองด้วยโลจิสติกส์แบบลิ้น ซึ่งพบว่าแนวทางการนำโลจิสติกส์แบบลิ้นมาใช้ในการลดต้นทุนกระบวนการขนส่งต้องนำหลักการโลจิสติกส์แบบลิ้นมาใช้ในการลดเวลากระบวนการต่าง ๆ ในการทำงาน โดยควรกำหนดเป็นนโยบายแนวทางในการทำงาน งานวิจัยของธมนวรรณ และสันห์ (2563) หาแนวทางแก้ไขการบริหารจัดการวัตถุดิบคงคลังเพื่อลดต้นทุนรวมสินค้าคงคลัง โดยพบว่าการใช้เทคนิคปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด (economic order quantity: EOQ) เพื่อหาค่าปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสินค้าคงคลังได้มูลค่า 262,016.34 บาทต่อปี และงานวิจัยของถิรนนท์ และวรัญญา (2562) ลดระยะเวลาการทำงานที่ซ้ำซ้อนของพนักงานและลดต้นทุนการดำเนินงานที่เกิดจากการทำงานในกิจกรรมการตรวจนับเมื่อรับสินค้าเข้าคลัง โดยหลังการจัดเรียงขั้นตอนใหม่ในการตรวจนับผลิตภัณฑ์ สามารถลดต้นทุนการดำเนินงานจากเดิม 4,035 บาท เหลือ 2,268.75 บาท ซึ่งประหยัดต้นทุนได้ 43.50 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1 การกำจัดก้อนเชื้อเห็ดแครงเก่าที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งในชุมชน

จากข้อมูลงานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่า การลดต้นทุนในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่จะนำเครื่องมือและหลักการทางวิศวกรรมอุตสาหการมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางความเป็นไปได้หรือแนวทางที่เหมาะสมในการลดต้นทุน ซึ่งเครื่องมือเหล่านั้นสามารถประยุกต์ใช้แล้วเกิดประโยชน์สูงสุดตามเป้าหมายที่วางไว้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง โดยจะเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและเพิ่มโอกาสทางการตลาดให้กับ

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมตามแนวทางโมเดลเศรษฐกิจใหม่ที่เรียกว่า "BCG" หรือ bio-circular-green economy เศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ

1. การผลิตกระถางเพาะกล้าไม้

การผลิตกระถางเพาะกล้าไม้มีวัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) ขี้เลื่อยไม้ยางพาราจากก้อนเชื้อเห็ดแคร่งเก่า ได้รับมาจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้เพาะเลี้ยงเห็ดแคร่ง ตำบลท่าข้าม อำเภอบางใหญ่ จังหวัดสงขลา 2) แป้งมันสำปะหลังชนิดพิเศษ ตราแมวแดงดาวเทียมลูกโลก จัดซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัดเกรียงไกรค้าแปง และ 3) ปุ๋ยเคมี สูตร 46:0:0 ที่มีเฉพาะธาตุไนโตรเจน

การขึ้นรูปกระถางเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุงกระบวนการดำเนินการโดยนำก้อนเชื้อเห็ดแคร่งเก่าจากเกษตรกรมาฉีกถุงพลาสติกออก จากนั้นทำให้ร้อนเป็นขี้เลื่อยแล้วนำไปตากแดดจัดเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นเตรียมตัวประสานโดยการนำแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำอัตราส่วนตามที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งให้ความร้อนด้วยไฟอ่อน ๆ จนสีแป้งเปียกใส แล้วนำไปพักไว้ให้เย็นตัวก่อนนำไปผสมกับขี้เลื่อย (ชาติรี และคณะ, 2566) นอกจากนี้หลังการปรับปรุงมีสูตรการขึ้นรูปจำนวน 3 สูตร โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมและสภาวะการขึ้นรูปกระถางก่อนและหลังการปรับปรุง

สูตรส่วนผสม	รายละเอียด
ก่อนการปรับปรุง	1) อบแห้งขี้เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง 2) ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ 150 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 150 กรัมต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร 3) ใช้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป
หลังการปรับปรุง สูตรที่ 1	1) ไม่อบแห้งขี้เลื่อยไม้ 2) ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ 150 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 100 กรัมต่อน้ำ 200 มิลลิลิตร 3) ไม่ใช้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป
หลังการปรับปรุง สูตรที่ 2	1) ไม่อบแห้งขี้เลื่อยไม้ 2) ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ 150 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 150 กรัมต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร 3) ไม่ใช้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป
หลังการปรับปรุง สูตรที่ 3	1) ไม่อบแห้งขี้เลื่อยไม้ 2) ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ 100 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 100 กรัมต่อน้ำ 300 มิลลิลิตร 3) ไม่ใช้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป

เมื่อเตรียมขี้เลื่อยไม้จากวัสดุเหลือทิ้งและตัวประสานเรียบร้อยแล้ว นำวัสดุเหล่านั้นคลุกเคล้าให้เข้ากันตามสูตรส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำวัสดุผสมใส่ในแม่พิมพ์กระถางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากกระถาง 105 มิลลิเมตร ความสูง 73 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร

แล้วอัดขึ้นรูปเป็นกระถางโดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก และใช้แรงดันในการอัด 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นนำวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปอบไล่ความชื้นหรืออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง (21,600 วินาที) จะได้กระถางเพาะกล้าไม้ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระถางเพาะกล้าไม้จากวัสดุเหลือทิ้งการเพาะเห็ดแครง

2. การวิเคราะห์กระบวนการผลิต

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ให้มีความต้นทุนการผลิตลดลงโดยใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการ มีเครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย แผนภูมิกระบวนการทำงาน แผนภูมิกระบวนการไหล และแนวคิดการลดความสูญเปล่า ซึ่งการวิเคราะห์ในแต่ละเครื่องมือมีรายละเอียดดังนี้

2.1 แผนภูมิกระบวนการทำงาน

เป็นเครื่องมือที่แสดงขั้นตอนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ ตั้งแต่วัตถุดิบเคลื่อนเข้าสู่สายการผลิตจนเสร็จสิ้นเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้สามารถแยกสายการผลิตออกเป็น 5 สายการผลิต ประกอบด้วย การเตรียมขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง การอบแห้ง การเตรียมตัวประสาน การผสมวัตถุดิบ และการขึ้นรูป

2.2 แผนภูมิกระบวนการไหล

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การไหลของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน คน และอุปกรณ์ ที่เคลื่อนไปในกระบวนการพร้อม ๆ กับกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งมีการนำมาใช้วิเคราะห์กระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้เพื่อค้นหากิจกรรมการผลิตที่ไม่จำเป็น กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาการผลิตนาน กิจกรรมที่มีการรอคอย และกิจกรรมที่มีการเคลื่อนย้ายระยะทางไกล เป็นต้น

2.3 แนวคิดการลดความสูญเปล่า

เป็นการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ที่มุ่งเน้นการกำจัด (eliminate) การรวมกัน (combine) การจัดใหม่ (rearrange) และการทำให้ง่าย (simplify) ในกระบวนการผลิตที่เป็นสาเหตุหลักในการทำให้กระถางเพาะกล้าไม้มีต้นทุนการผลิตสูง

3. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

การคำนวณต้นทุนก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ มีต้นทุนหลักที่เกี่ยวข้อง คือ ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ต้นทุนแรงงานทางตรง และต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งในการคำนวณแต่ละต้นทุนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง

ในกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครง วัตถุดิบที่มีต้นทุนทางตรง ได้แก่ ก้อนเห็ดแครงเก่า แป้งมันสำปะหลัง และน้ำมันพืช ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนวัตถุดิบทางตรงของกระถางในแต่ละใบ โดยใช้สมการ (1)

$$\text{วัตถุดิบทางตรง (บาท)} = \frac{\text{ราคาวัตถุดิบ}}{\text{ปริมาณที่ใช้}} \quad (1)$$

3.2 ต้นทุนแรงงานทางตรง

ในกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครง สามารถคำนวณต้นทุนแรงงานทางตรง โดยใช้สมการ (2)

$$\text{ค่าแรงต่อหน่วยเวลา (บาท)} = \frac{\text{อัตราค่าแรง}}{\text{เวลาการทำงาน}} \quad (2)$$

3.3 ต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครง สามารถคำนวณต้นทุนพลังงาน โดยใช้สมการ (3) และ (4)

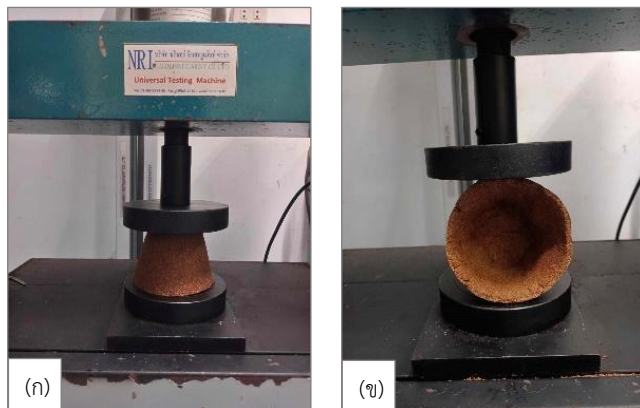
$$\text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1,000} \quad (3)$$

$$\text{ค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (บาท)} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)} \times \text{อัตราค่าไฟ}}{\text{จำนวนที่ผลิตได้}} \quad (4)$$

4. การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ

4.1 การทดสอบการต้านทานแรงอัด

การทดสอบการต้านทานแรงอัดทั้งในแนวตั้ง (vertical compressive force) และในแนวนอน (horizontal compressive force) ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล อเนกประสงค์ รุ่น NRI-TS500-50 จากบริษัท นรินทร์ อินสทรูเมนต์ จำกัด ซึ่งในการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D642 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2020) โดยใช้ความเร็วในการอัด 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการทดสอบสุทธละ 3 ตัวอย่าง และบันทึกค่าแรงอัดที่การเสียรูป 15 มิลลิเมตร (พรฤดี, 2552) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทดสอบการต้านทานแรงอัดในแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)

4.2 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำ ดำเนินการตามมาตรฐาน TAPPI T441 om-90 (TAPPI T 441, 2013) โดยนำกระดาษมาตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาด 5×5 เซนติเมตร สุ่มละ 3 ตัวอย่าง จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการแช่น้ำด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง แล้วนำชิ้นทดสอบแช่น้ำให้ผิวด้านบนอยู่ใต้ผิวน้ำเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นทดสอบซับน้ำด้วยกระดาษซับน้ำ และชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการแช่น้ำอีกครั้ง หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น โดยใช้สมการ (5)

$$\%WA = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ WA คือ การดูดซับน้ำ (เปอร์เซ็นต์)

W_1 คือ น้ำหนักหลังการแช่น้ำ

W_0 คือ น้ำหนักก่อนการแช่น้ำ

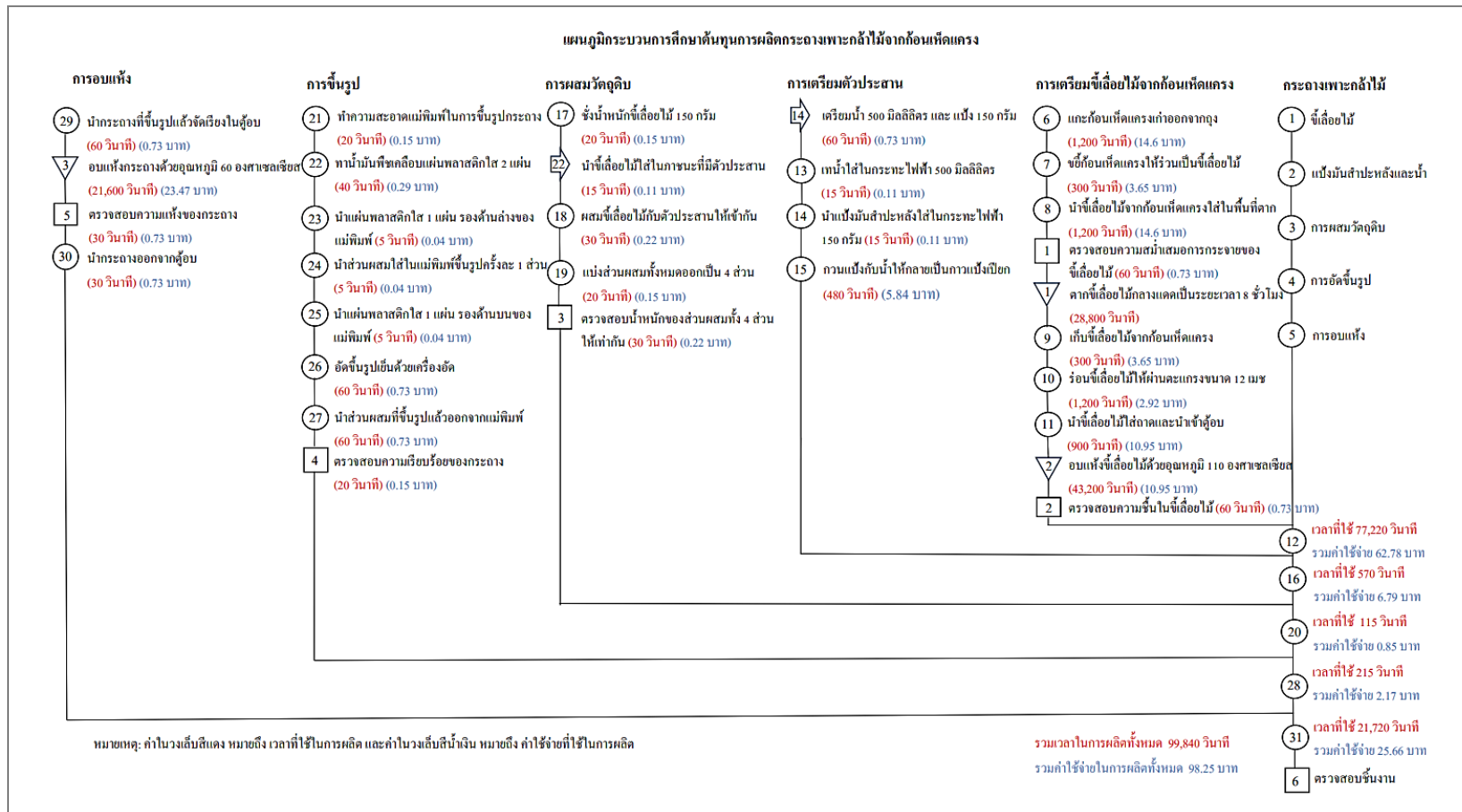
ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์กระบวนการผลิต

ในการขึ้นรูปกระดาษเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุง สามารถวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิกระบวนการทำงาน (ภาพที่ 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูปกระดาษเพาะกล้าไม้พบว่า มี 5 สายการผลิต ประกอบด้วย การเตรียมขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง การเตรียมตัวประสาน การผสมวัตถุดิบ การขึ้นรูป และการอบแห้ง โดยมีเวลาที่ใช้ในการผลิตรวม 99,840 วินาที และสายการผลิตที่ใช้เวลาในการผลิตมากที่สุดถึงน้อยที่สุด คือ การเตรียมขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง 77,220 วินาที การอบแห้ง 21,720 วินาที การเตรียมตัวประสาน 570 วินาที การขึ้นรูป 215 วินาที และการผสมวัตถุดิบ 115 วินาที ตามลำดับ ขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในแต่ละกระบวนการ พบว่าสายการผลิตที่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตมากที่สุดถึงน้อยที่สุด คือ การเตรียมขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง

62.78 บาท การอบแห้ง 25.66 บาท การเตรียมตัวประสาน 6.79 บาท การขึ้นรูป 2.13 บาท และการผสมวัตถุดิบ 0.85 บาท ตามลำดับ

นอกจากนี้แผนภูมิกระบวนการไหลการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ (ภาพที่ 5) ซึ่งแสดงให้เห็นกิจกรรมการผลิตที่ไม่จำเป็น กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาการผลิตนาน กิจกรรมที่มีการรอคอย และกิจกรรมที่มีการเคลื่อนย้ายระยะทางไกล จากแผนภูมิแสดงให้เห็นว่า มีระยะทางในการเคลื่อนย้ายรวม 27 เมตร โดยกระบวนการที่มีระยะทางการเคลื่อนย้ายสูงสุด 3 อันดับแรก คือ ร่อนขี้เลื่อยไม้ให้ผ่านตะแกรงขนาด 12 เมช มีระยะทางในการเคลื่อนย้าย 10 เมตร รองลงมา คือ นำกระถางที่ขึ้นรูปแล้วจัดเรียงในตูบ มีระยะทางในการเคลื่อนย้าย 5 เมตร และนำกระถางออกจากตูบ มีระยะทางในการเคลื่อนย้าย 5 เมตร ขณะเดียวกันในกระบวนการผลิตใช้ระยะเวลารวม 99,840 วินาที ซึ่งกระบวนการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานสูงสุด 3 อันดับแรก คือ อบแห้งขี้เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 43,200 วินาที ตากขี้เลื่อยไม้กลางแจ้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ใช้ระยะเวลา 28,800 วินาที และอบแห้งกระถางด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 21,600 วินาที



ภาพที่ 4 แผนภูมิกระบวนการทำงานการผลิตกระดาษเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครงก่อนการปรับปรุง

แผนภูมิกระบวนการไหลการผลิตกระดาษเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครง (ก่อนการปรับปรุง)					
○ การดำเนินงาน ➡ การขนส่ง □ การรอคอย □ การตรวจสอบ ▽ การจัดเก็บ					
ลำดับ	ชื่อกระบวนการ	ระยะทาง (เมตร)	ระยะเวลา (วินาที)	สัญลักษณ์	
1	แกะก้อนเห็ดแครงเก่าออกจากถุง	0	1,200	● ➡ □ □ ▽	
2	ขยี้ก้อนเห็ดแครงให้ร่วนเป็นขี้เลื่อยไม้	0	300	● ➡ □ □ ▽	
3	นำขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครงใส่ในพื้นที่ตาก	0	1,200	● ➡ □ □ ▽	
4	ตรวจสอบความสม่ำเสมอการกระจายของขี้เลื่อยไม้	0	60	○ ➡ □ □ ▽	
5	ตากขี้เลื่อยไม้กลางแดดเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง	0	28,800	○ ➡ □ □ ▽	
6	เก็บขี้เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง	0	300	● ➡ □ □ ▽	
7	ร่อนขี้เลื่อยไม้ให้ผ่านตะแกรงขนาด 12 เมช	10	1,200	● ➡ □ □ ▽	
8	นำขี้เลื่อยไม้ใส่ถาดและนำเข้าตู้อบ	2	900	● ➡ □ □ ▽	
9	อบแห้งขี้เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	0	43,200	○ ➡ □ □ ▽	
10	ตรวจสอบความชื้นในขี้เลื่อยไม้	0	60	○ ➡ □ □ ▽	
11	เตรียมน้ำ 500 มิลลิลิตร และ แปะ 150 กรัม	1	60	○ ➡ □ □ ▽	
12	เทน้ำใส่ในกระโหลกไฟฟ้า 500 มิลลิลิตร	0	15	● ➡ □ □ ▽	
13	นำแป้งมันสำหรับหลังใส่ในกระโหลกไฟฟ้า 150 กรัม	0	15	● ➡ □ □ ▽	
14	กวนแป้งกับน้ำให้กลายเป็นกาวแปะเปียก	0	480	● ➡ □ □ ▽	
15	ชั่งน้ำหนักขี้เลื่อยไม้ 150 กรัม	1	20	● ➡ □ □ ▽	
16	นำขี้เลื่อยไม้ใส่ในภาชนะที่มีตัวประสาน	1	15	○ ➡ □ □ ▽	
17	ผสมขี้เลื่อยไม้กับตัวประสานให้เข้ากัน	0	30	● ➡ □ □ ▽	
18	แบ่งส่วนผสมทั้งหมดออกเป็น 4 ส่วน	0	20	● ➡ □ □ ▽	
19	ตรวจสอบน้ำหนักของส่วนผสมทั้ง 4 ส่วน ให้เท่ากัน	0	30	○ ➡ □ □ ▽	
20	ทำความสะอาดแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปกระดาษ	0	20	● ➡ □ □ ▽	
21	ทาน้ำมันพืชเคลือบแผ่นพลาสติกใส 2 แผ่น	0	40	● ➡ □ □ ▽	
22	นำแผ่นพลาสติกใส 1 แผ่น รองด้านล่างของแม่พิมพ์	0	5	● ➡ □ □ ▽	
23	นำส่วนผสมใส่ในแม่พิมพ์ขึ้นรูปครั้งแรก 1 ส่วน	0	5	● ➡ □ □ ▽	
24	นำแผ่นพลาสติกใส 1 แผ่น รองด้านบนของแม่พิมพ์	0	5	● ➡ □ □ ▽	
25	อัดขึ้นรูปเย็นด้วยเครื่องอัด	1	60	● ➡ □ □ ▽	
26	นำส่วนผสมที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแม่พิมพ์	1	60	● ➡ □ □ ▽	
27	ตรวจสอบความเรียบร้อยของกระดาษ	0	20	○ ➡ □ □ ▽	
28	นำกระดาษที่ขึ้นรูปแล้วจัดเรียงในตู้อบ	5	60	● ➡ □ □ ▽	
29	อบแห้งกระดาษด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	0	21,600	○ ➡ □ □ ▽	
30	ตรวจสอบความแห้งของกระดาษ	0	30	○ ➡ □ □ ▽	
31	นำกระดาษออกจากตู้อบ	5	30	● ➡ □ □ ▽	
รวม		27	99,840	21	2 0 5 3

ภาพที่ 5 แผนภูมิกระบวนการไหลการผลิตกระดาษเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครงก่อนการปรับปรุง

หลังจากนั้น ได้ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS เพื่อช่วยจัดการทรัพยากรในด้านค่าใช้จ่าย และการจัดการเวลาในการผลิตให้สามารถลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตได้ ผลการวิจัยประยุกต์ใช้ ECRS สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) หลักการกำจัด คือ ในงานวิจัยนี้ได้กำจัดกระบวนการนำขี้เลื่อยไม้ไผ่สด เป็นเวลา 900 วินาที ระยะทาง 2 เมตร อบแห้งขี้เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 43,200 วินาที และตรวจสอบความชื้นในขี้เลื่อยไม้ เป็นเวลา 60 วินาที เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปนั้น ขี้เลื่อยไม้จำเป็นต้องมีความชื้นเป็นศูนย์ก็สามารถขึ้นรูปกระถางได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปกระถางและสมบัติต่าง ๆ และการลดวัตถุดิบในการผลิตที่ไม่จำเป็นออก คือ น้ำมันพืชที่ใช้ในการเคลือบแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปกระถาง ซึ่งจากการทดลองขึ้นรูปโดยไม่ใช้น้ำมันเคลือบ แม่พิมพ์ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปกระถาง

2) หลักการรวมกัน คือ การรวมการตากแห้งขี้เลื่อยและการร่อนขี้เลื่อย สามารถลดเวลาการทำงานลงได้ 1,200 วินาที เนื่องจากกระบวนการทั้งสองนี้สามารถทำงานพร้อมกันได้ ดังนั้นสามารถลดเวลาในการเตรียมวัตถุดิบลง เมื่อตากแห้งขี้เลื่อยไม้ ในระหว่างที่รอการตากแห้งขี้เลื่อยไม้ สามารถไปร่อนขี้เลื่อยไม้เพื่อไม่ให้เกิดเวลาการรอคอยที่สูญเปล่า

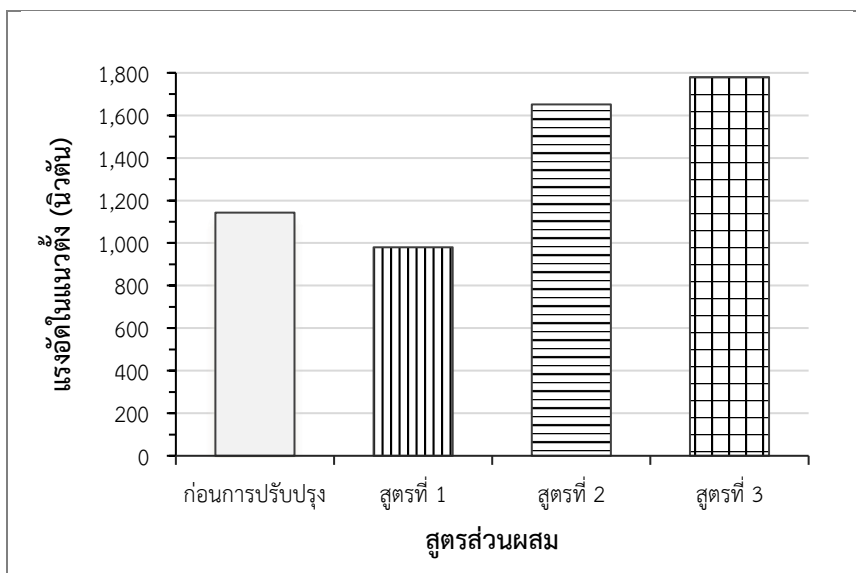
3) หลักการจัดใหม่ การจัดเรียงลำดับงานจากกระบวนการแรกจนจบกระบวนการ เนื่องจากในการทำงานจะมีช่วงเวลาของการรอคอยเป็นอย่างมาก เช่น การรอขี้เลื่อยไม้แห้งจากการตาก การรอกระถางแห้งเมื่อนำเข้าเตาอบ ซึ่งสามารถทำงานในกระบวนการอื่น ๆ ได้ในระหว่างการรอคอย เช่น รอขี้เลื่อยแห้ง ระหว่างรอต้องมีการทำงานตลอดโดยไม่ปล่อยให้เวลาเสียเปล่า

4) หลักการทำให้ง่ายขึ้น ลดการเคลื่อนไหวในขณะปฏิบัติงาน เนื่องจากพื้นที่การผลิตของบางกระบวนการมีระยะทางห่างไกลกันของเครื่องจักร ดังนั้นจึงปรับปรุงการทำงานให้ง่ายขึ้น เพื่อลดเวลาการทำงาน

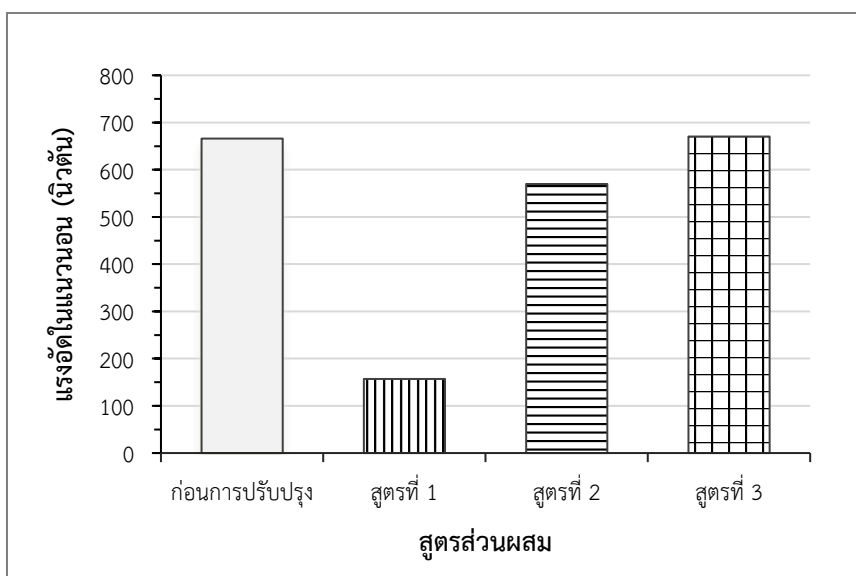
นอกจากปรับปรุงกระบวนการผลิตต่าง ๆ เพื่อลดต้นทุนแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสูตรส่วนผสมและมีการพิสูจน์ว่าการปรับปรุงกระบวนการผลิตไม่ได้ทำให้สมบัติทางกลและทางกายภาพของกระถางเพาะกล้าไม้ด้อยลง

2. ผลการทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของกระถางเพาะกล้าไม้

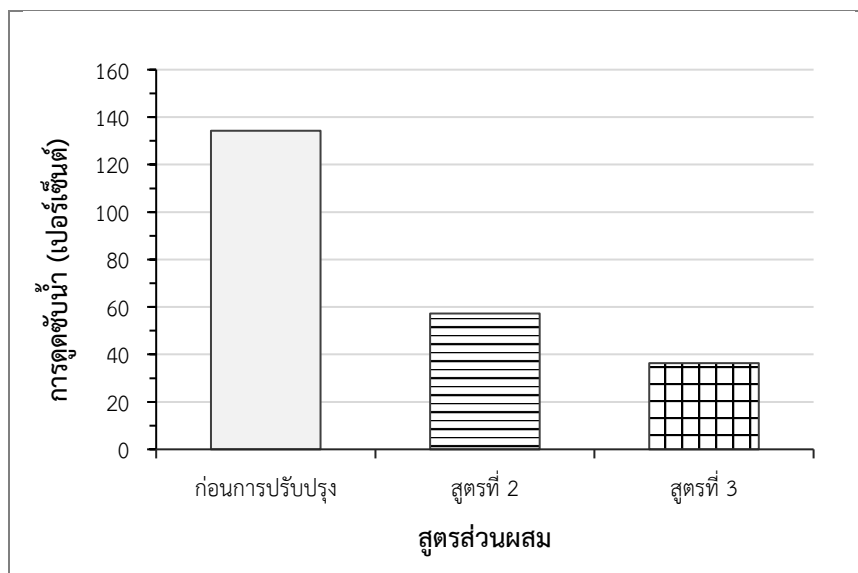
ผลกระทบปริมาณส่วนผสมและการปรับปรุงกระบวนการผลิตผ่านสูตรต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 ได้แสดงค่าแรงอัดในแนวตั้งและในแนวนอนของกระถางเพาะกล้าไม้ ดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยชี้ให้เห็นว่ากระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 2 และ 3 มีค่าแรงอัดในแนวตั้งสูงกว่ากระถางเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุง และกระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 1 มีค่าแรงอัดในแนวตั้งต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันกระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 3 มีค่าแรงอัดในแนวนอนสูงไม่แตกต่างจากกระถางเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุง นอกจากนี้เมื่อนำกระถางเพาะกล้าไม้ตัวอย่างไปทดสอบการดูดซับน้ำ พบว่ากระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 1 ไม่สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำได้ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบละลายไปกับน้ำจนไม่สามารถนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำได้ อย่างไรก็ตามในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นด้วยว่ากระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 2 และ 3 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำน้อยกว่ากระถางเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุงอย่างชัดเจน



ภาพที่ 6 การต้านทานแรงอัดในแนวตั้งของกระถางเพาะกล้าไม้ก่อนและหลังการปรับปรุง



ภาพที่ 7 การต้านทานแรงอัดในแนวนอนของกระถางเพาะกล้าไม้ก่อนและหลังการปรับปรุง



ภาพที่ 8 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของกระถางเพาะกล้าไม้ก่อนและหลังการปรับปรุง

3. ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

การคำนวณต้นทุนก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ มีต้นทุนหลักที่เกี่ยวข้อง คือ ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ต้นทุนแรงงานทางตรง และต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งผลในการคำนวณต้นทุนมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครงในสูตรก่อนการปรับปรุง คือ 9.68 บาทต่อใบ โดยประกอบด้วยค่าวัตถุดิบทางตรง 4.82 บาทต่อใบ ค่าแรงทางตรงจำนวน 1 คน 4.26 บาทต่อใบ และค่าพลังงาน 0.59 บาทต่อใบ ในขณะเดียวกัน เนื่องจากกระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 3 มีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่เทียบเท่าหรือบางสมบัติเหนือกว่ากระถางเพาะกล้าไม้ก่อนการปรับปรุง ดังนั้นการคำนวณต้นทุนหลังการปรับปรุงจะคำนวณเฉพาะกระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 3 ซึ่งพบว่าต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครงในสูตรหลังการปรับปรุง คือ 6.60 บาทต่อใบ โดยประกอบด้วยค่าวัตถุดิบทางตรง 2.20 บาทต่อใบ ค่าแรงทางตรง 4.19 บาทต่อใบ และค่าพลังงาน 0.21 บาทต่อใบ ดังนั้นผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตและสูตรส่วนผสมดังกล่าวสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ 31.8 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 ต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จากก้อนเห็ดแครง ก่อนและหลังการปรับปรุง

สูตรส่วนผสม	ค่าวัตถุดิบทางตรง (บาท)	ค่าแรงงานทางตรง (บาท)	ค่าพลังงาน (บาท)	ต้นทุนต่อใบ (บาท)
ก่อนการปรับปรุง	4.82	4.26	0.59	9.68
หลังการปรับปรุง สูตรที่ 3	2.20	4.19	0.21	6.60

การอภิปรายผลการวิจัย

ในการลดต้นทุนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้จำเป็นต้องเข้าใจและทราบองค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือส่วนใหญ่นำมาประยุกต์ใช้คือ แผนภูมิกระบวนการทำงาน และแผนภูมิกระบวนการไหล โดยแผนภูมิกระบวนการทำงานสามารถทำให้เห็นองค์ประกอบการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ทั้งหมดอย่างละเอียด และแผนภูมิกระบวนการไหลทำให้ทราบได้ว่า กิจกรรมการผลิตใดที่ไม่จำเป็น กิจกรรมใดที่ใช้ระยะเวลาการผลิตนาน กิจกรรมใดที่มีการรอคอย และกิจกรรมใดที่มีการเคลื่อนย้ายระยะทางไกล ซึ่งการประยุกต์ใช้เครื่องมือเหล่านี้มีความสำเร็จเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของเดโซชัย (2564) ที่ศึกษากระบวนการผลิตอุปกรณ์ตกแต่งรถยนต์ โดยใช้เครื่องมือแผนภูมิกระบวนการไหล ซึ่งจากการวิเคราะห์แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอุปกรณ์ตกแต่งรถยนต์สามารถลดระยะทางการทำงานในกระบวนการผลิตได้ถึง 29.41 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเมื่อทราบกระบวนการผลิตที่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง ได้นำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ ซึ่งสามารถลดการอบขี่เลื่อยไม้ก่อนเห็ดแครง การรวมการตากแห้งซี่เลื่อยไม้และการร่อนซี่เลื่อยไม้ให้มีความทำงานพร้อมกัน การจัดเรียงลำดับงานจากกระบวนการแรกจนจบกระบวนการใหม่ และการลดการเคลื่อนไหวในขณะปฏิบัติงาน โดยหลักการ ECRS นี้มักมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น งานวิจัยของชิตชนู และศุภชัย (2564) ใช้หลัก ECRS ในการจัดเรียงวิธีการทำงานใหม่รวมถึงการออกแบบพื้นที่วางแผ่นเหล็กเพื่อลดเวลาในการจัดเตรียมวัตถุดิบ ผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนการทำงานของเครื่องจักรปี้โลหะแผ่นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 61.68 เปอร์เซ็นต์ หรือเพิ่มขึ้นจากเดิม 7.13 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของมงคล (2565) นำเทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิตและ ECRS มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาแนวทางการลดความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุถั่วลิสงคั่วทราย หลังจากการนำแนวทางการปรับปรุงด้วยการจัดสมดุลสายการผลิตและการจัดเรียงงานใหม่ การรวมงานเข้าด้วยกัน กำจัดงานที่ไม่จำเป็นออก และทำให้งานที่มีทำได้ง่ายขึ้นตามหลักการ ECRS สามารถทำให้เวลาสูญเปล่าในขั้นตอนการบรรจุถั่วลิสงคั่วทรายนลดลง 26 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัย

การผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ด้วยซี่เลื่อยจากก้อนเชื้อเห็ดแครงนั้นมีต้นทุนการผลิตที่สูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตกระถางเพาะกล้าไม้ให้ต้นทุนการผลิตลดลง โดยใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิกระบวนการทำงานพบว่า การขึ้นรูปกระถางเพาะกล้าไม้พบว่ามี 5 สายการผลิต ประกอบด้วย การเตรียมซี่เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง การเตรียมตัวประสาน การผสมวัตถุดิบ การขึ้นรูป และการอบแห้ง และสายการผลิตที่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตมากที่สุด คือ การเตรียมซี่เลื่อยไม้จากก้อนเห็ดแครง 62.78 บาท รองลงมา คือ การอบแห้ง 25.66 บาท ในขณะเดียวกัน แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการทำงานสูงสุด 3 อันดับแรก คือ อบแห้งซี่เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 43,200 วินาที ตากซี่เลื่อยไม้กลางแดดเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ใช้ระยะเวลา 28,800 วินาที และอบแห้งกระถางด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 21,600 วินาที ดังนั้นจึงมีการนำหลักการ ECRS มาประยุกต์ใช้ ซึ่งประกอบด้วย (1) การกำจัด

สามารถกำจัดการนำชี้เลื่อยไม้ใส่ถาด เป็นเวลา 900 วินาที ระยะทาง 2 เมตร การอบแห้งชี้เลื่อยไม้ด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 43,200 วินาที และการตรวจสอบความชื้นในชี้เลื่อยไม้เป็นเวลา 60 วินาที (2) การรวมกัน โดยการรวมการตากแห้งชี้เลื่อยไม้และการร่อนชี้เลื่อยไม้ให้มทำงานพร้อมกัน สามารถลดเวลาการทำงานลงได้ 1,200 วินาที (3) การจัดใหม่ โดยการจัดเรียงลำดับงานจากกระบวนการแรกจนจบกระบวนการใหม่ และ (4) การทำให้ง่ายขึ้น โดยลดการเคลื่อนไหวในขณะปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามนอกจากปรับปรุงกระบวนการผลิตต่าง ๆ เพื่อลดต้นทุนแล้ว ได้มีการปรับปรุงสูตรส่วนผสมและมีการพิสูจน์ว่าการปรับปรุงกระบวนการผลิตไม่ได้ทำให้สมบัติทางกลและทางกายภาพของกระถางเพาะกล้าไม้ด้อยลง ซึ่งพบว่ากระถางเพาะกล้าไม้หลังการปรับปรุงสูตรที่ 3 ซึ่งผลิตจากชี้เลื่อยไม้ 100 กรัม แป้งมันสำปะหลัง 100 กรัมต่อน้ำ 300 มิลลิลิตร และไม้น้ำมันพืชเคลือบแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป มีค่าแรงอัดในแนวตั้ง 1,780 นิวตัน และเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ 36.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่ากระถางก่อนการปรับปรุงสูตร ดังนั้นผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตและสูตรส่วนผสมดังกล่าวสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ 31.8 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว.) (รหัสโครงการ 180989) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ภายใต้ชุดโครงการ “การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมเพื่อสร้างคุณค่าและยกระดับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้เพาะเลี้ยงเห็ดแครง ตำบลท่าข้าม อำเภอนาทม จังหวัดสงขลา บนพื้นฐานศักยภาพและทรัพยากรท้องถิ่นอย่างยั่งยืน”

เอกสารอ้างอิง

- ชาตรี หอมเขียว นศพร ธรรมโชติ และวรพงศ์ บุญช่วยแทน. (2566). การพัฒนากระถางเพาะกล้าไม้ที่ย่อยสลายได้จากวัสดุเหลือทิ้งการเพาะเห็ดแครง. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 77-92.
- ชิตษณุ ภักดีวานิช และศุภชัย วีระเดช. (2564). การเพิ่มอัตราการทำงานของเครื่องจักรปั๊มโลหะแผ่นด้วยหลักการ ECRS. *PBRU Science Journal*, 18(2), 86-97.
- เดโชชัย สาพิมพ์. (2564). การปรับปรุงกระบวนการผลิตอุปกรณ์ตกแต่งรถยนต์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช*, 1(1), 9-18.
- เดชิต อินสว่าง. (2564). *การลดต้นทุนกระบวนการขนส่งในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีสังเคราะห์ปุ๋ยในจังหวัดระยองด้วยโลจิสติกส์แบบลิ้น*. วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต (สำหรับผู้บริหาร). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- ถิรนนท์ ทิวราตรีวิทย์ และวรัญญา อวีระพล. (2562). การลดต้นทุนการดำเนินงานในกระบวนการผลิตภัณฑ์เข้าคลังสินค้า กรณีศึกษา โรงงานผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ประเภทขวดแก้ว. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาลัยนครราชสีมา ครั้งที่ 6 ประจำปี พ.ศ.2562 สังคมผู้สูงวัย: โอกาสและความท้าทายของอุดมศึกษา* (หน้า 272-281). นครราชสีมา: วิทยาลัยนครราชสีมา.

- ธมนวรรณ นาคเสนอินทร์ และสันต์ รัฐวิบูลย์. (2563). การลดต้นทุนสินค้าคงคลังโดยใช้หลัก ABC ของบริษัทกรณีศึกษา. *วารสารบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต*, 9(1), 1-13.
- พรฤดี สงวนสุข. (2552). *การพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนเยื่อกระดาษจากบ่อบำบัดน้ำเสียสำหรับกล้าไม้*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มงคล กิตติญาณขจร. (2565). การลดความสูญเปล่าในกระบวนการบรรจุถั่วลิสงคั่วทรายโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิตและ ECRS. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, 15(1), 11-22.
- ลลนา สุวรรณ. (2560). *การลดต้นทุนคลังบรรจุภัณฑ์ด้วยหลักการ ECRS กรณีศึกษา: ผู้ผลิตคอมพิวเตอร์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน). มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพฯ.
- สาวิตรี ยุพเยาว์. (2564). การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนของกระบวนการผลิตน้ำมะนาวบรรจุขวดพลาสติกใส กรณีศึกษา บริษัท บ้านมะนาว จำกัด. ใน *การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 16* (หน้า 1059-1066). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยรังสิต.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2020). *Standard test method for determining compressive resistance of shipping containers, components, and unit loads: ASTM D642*. Pennsylvania: ASTM International.
- TAPPI T 441. (2013). *Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper, paperboard, and corrugated fiberboard (Cobb test)*. Chicago: Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ
ด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดิน
Automated Mango Irrigation System
Using Soil Water Potential Measurement Technique

ภูมิพัฒน์ คำคำ^{1*}
 Phumiphat Kakham^{1*}

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดิน พลังงานความดันนี้เป็นค่าที่สะท้อนความต้องการดิ่งน้ำในดินของพืชซึ่งตรวจวัดด้วยอุปกรณ์วัดแรงดิ่งน้ำของดิน ระบบให้น้ำพัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์มไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน ประกอบเข้ากับอุปกรณ์วัดแรงดิ่งน้ำของดินจำนวนสองตัว และเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์เฟิร์มแวร์ควบคุมการเริ่มให้น้ำต้นมะม่วงเมื่อปริมาณแสงธรรมชาติสูงกว่า 20,000 ลักซ์ และที่ระดับความลึก 1/4 และ 3/4 ของเขตชั้นรากมีค่าต่ำกว่า -25 กิโลปาสกาล (kPa) และ -10 กิโลปาสกาล ตามลำดับ โดยเครื่องสูบน้ำจะหยุดให้น้ำเมื่อค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ระดับความลึก 1/4 ของเขตชั้นรากมีค่าสูงกว่า -25 กิโลปาสกาล ระบบให้น้ำนี้ถูกนำไปทดสอบกับสวนมะม่วงของเกษตรกรที่ตำบลปากน้ำอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ในระหว่างวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2565 พบว่าในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. สามารถให้น้ำต้นมะม่วงได้อย่างอัตโนมัติจำนวน 8 ครั้ง คิดเป็นชั่วโมงทำงานร้อยละ 6.20 สามารถรักษาค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ระดับความลึก 1/4 ถึง 3/4 ของเขตชั้นรากให้อยู่ในช่วง -10 ถึง -30 กิโลปาสกาล ได้ค่าเฉลี่ยร้อยละ 53.16 ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณน้ำเหมาะสมที่รากพืชสามารถดูดน้ำในดินไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย

คำสำคัญ: ระบบให้น้ำพืช การวัดความชื้นของดิน อุปกรณ์วัดแรงดิ่งน้ำของดิน พลังงานความดันของน้ำในดิน

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

* Corresponding author e-mail: phumiphat@techno.rru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.258678>

Received: 21 April 2023, Revised: 16 October 2024, Accepted: 6 November 2024

Abstract

This study presents an automated mango irrigation system based on soil water potential measurements. Soil water potential, which reflects the plant's water uptake needs, was measured using tensiometers. The irrigation system was developed on an Arduino-based platform and integrated with two tensiometers and a solar-powered water pump. The firmware was programmed to initiate watering when natural light exceeded 20,000 lux and the soil water potential fell below -25 kPa at 1/4 of the root zone depth and -10 kPa at 3/4 of the root zone depth. Watering ended when soil water potential at 1/4 of the root zone depth exceeds -25 kPa. The system was tested in a farmer's mango orchard in Pak Nam Subdistrict, Bang Khla District, Chachoengsao Province. This irrigation system was tested in a farmer's mango orchard in Pak Nam Subdistrict, Bang Khla District, Chachoengsao Province, between December 20, 2021, and January 11, 2022. Results showed that the system automatically irrigated the mango trees approximately 8 times per day between 8.00 AM and 4.00 PM, corresponding to 6.20% of operational hours. The soil water potential with 1/4 of the root zone depth was maintained between -10 and -30 kPa, with an average value of 53.16%. This range represents an optimal moisture level, allowing plant roots to efficiently absorb water from the soil.

Keywords: Irrigation, Soil moisture measurement, Tensiometer, Soil water potential

บทนำ

ภาคเกษตรกรรมถือเป็นภาคการผลิตที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ ที่ผ่านมาเกษตรกรประสบปัญหาหลายด้าน เช่น การพัฒนาศักยภาพการผลิต การรักษาเสถียรภาพราคาสินค้า และการพัฒนาคุณภาพมาตรฐาน ผลผลิตทางการเกษตรราคาตกต่ำแต่ต้นทุนการผลิตสูง ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งเกิดจากสภาพความไม่แน่นอนของดิน ฟ้า อากาศ แหล่งน้ำ ภัยพิบัติธรรมชาติ และการระบาดของศัตรูพืช (ณัฐกิตติ์, 2563) น้ำเป็นผลิตผลจากธรรมชาติที่เราไม่สามารถผลิตเพิ่มขึ้นมาหรือลดปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติได้เองตามต้องการ (ปราโมทย์, 2557) น้ำเป็นปัจจัยหลักในการดำเนินกิจกรรมขับเคลื่อนเศรษฐกิจจากภาคบริการ ไฟฟ้า ประปา อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม การใช้น้ำในภาคเกษตรกรรมสูงถึงร้อยละ 75 ของปริมาณการใช้น้ำทั้งหมด แต่สร้างมูลค่าเพิ่มได้ต่ำที่สุดเพียง 11 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (สมเกียรติ, 2565) ประเทศไทยมีพื้นที่แหล่งน้ำราว 9.37 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 2.92 ของเนื้อที่ประเทศ ในขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมมีจำนวนมากถึง 178.74 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 55.73 (ณัฐกิตติ์, 2563) การบริหารจัดการน้ำจึงเป็นนโยบายเร่งด่วนและมีความสำคัญระดับประเทศในระดับเกษตรซึ่งถือว่าเป็นกลไกสำคัญที่สามารถบริหารจัดการน้ำด้วยเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้น้ำ

เกษตรแม่นยำสามารถพัฒนาได้ง่ายขึ้น ด้วยพัฒนาการทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ ยังผลให้นักวิจัยสามารถพัฒนาระบบเกษตรแม่นยำที่มีคุณลักษณะตามความต้องการ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและราคาประหยัด ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยด้านระบบเกษตรแม่นยำหรือระบบเกษตรอัจฉริยะอย่างกว้างขวาง เช่น การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะที่ออกแบบใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งจากแอปพลิเคชันบลิงก์ (blynk application) ร่วมกับโนดเอ็มซียู (NodeMCU) (พรทิพย์ และคณะ, 2565) ระบบควบคุมประตุน้ำแบบอัตโนมัติที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนนาโนเชื่อมต่อแบบไร้สายกับเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน และสามารถควบคุมระยะไกลผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Pramanik *et al.*, 2022) ระบบชลประทานอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพัฒนาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโนทำงานร่วมกับเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Akhter *et al.*, 2022) ระบบรดน้ำพืชอัตโนมัติด้วยสมาร์ตโฟนผ่านเน็ตพาย (NETPIE) ซึ่งประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (กรณิการ์, 2563) เป็นต้น

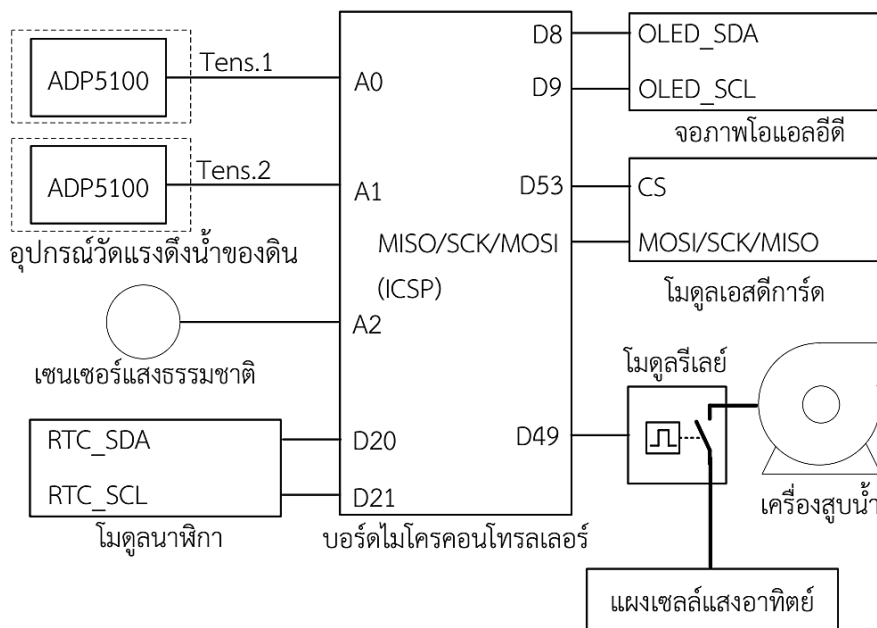
การให้น้ำพืชแบบอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของเกษตรแม่นยำ แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ อาศัยเวลา ความชื้นของดิน อัตราคายระเหย และตามความต้องการพืช (เสกสรรค์ และเกสร, 2565) การประเมินความต้องการน้ำของพืช โดยแบ่งสภาพดินตามค่าแรงดันน้ำของดินออกเป็น 5 ช่วง คือ ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (0 กิโลปาสกาล) ดินแฉะ (0 ถึง -10 กิโลปาสกาล) ดินเปียก (-10 ถึง -30 กิโลปาสกาล) ดินแห้ง (-30 ถึง -50 กิโลปาสกาล) และดินแห้งมาก (น้อยกว่า -50 กิโลปาสกาล) โดยสภาพดินเปียกเป็นดินที่เหมาะสมที่รากพืชสามารถดูดน้ำในดินไปใช้งานได้ง่ายและได้ในปริมาณที่เป็นประโยชน์ บริเวณรากมีอากาศถ่ายเทเพียงพอ (สุนทรี และคณะ, 2560) งานวิจัยนี้นำเสนอระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดิน จัดอยู่ในกลุ่มของระบบการให้น้ำพืชแบบอัตโนมัติ โดยจะรักษาระดับแรงดันน้ำของดินให้อยู่ในช่วง -10 ถึง -30 กิโลปาสกาล ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวเป็นเทคนิคการวัดและควบคุมการให้น้ำที่ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และให้ความเชื่อมั่นได้ในการประหยัดน้ำ (Rajan *et al.*, 2016)

วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดินที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน เมกา 2560 (arduino mega 2560) เซนเซอร์ความดัน เซนเซอร์แสงธรรมชาติ โมดูลนาฬิกา (clock module) จอภาพโอแอลอีดี (OLED display) โมดูลเอสดีการ์ด (SD card module) โมดูลรีเลย์ (relay module) เครื่องสูบน้ำ และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดิน

ผังวงจรการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับบอร์ดอาดุยโน เมกา 2560 แสดงดังภาพที่ 1 เซนเซอร์ความดัน (ADP5100) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดิน จำนวน 2 ตัว และเซนเซอร์แสงธรรมชาติ จำนวน 1 ตัว ต่อกับช่องรับสัญญาณแอนะล็อก A0 ถึง A2 ตามลำดับ โมดูลนาฬิกาต่อกับพอร์ตดิจิตัล D20 และ D21 จอภาพโอแอลอีดีแสดงข้อมูลวันเวลาและค่าแรงดันน้ำของดินต่อกับพอร์ตดิจิตัล D8 และ D9 โมดูลเอสดีการ์ดต่อขาสัญญาณ CS MOSI SCK และ MISO กับพอร์ตดิจิตัล D53 และพอร์ต ICSP ตามลำดับ โมดูลรีเลย์ถูกสั่งงานผ่านพอร์ตดิจิตัล D49 เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์

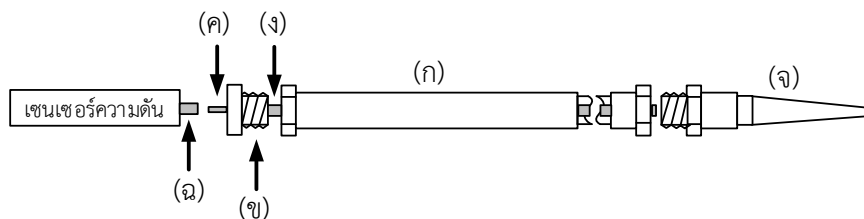
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน เมกา 2560 มีพอร์ตแอนะล็อกความละเอียด 10 บิต รับแรงดันไฟฟ้าอินพุต 0 ถึง 5 โวลต์ จำนวน 16 ช่อง พอร์ตดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุต จำนวน 64 ช่อง และมีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช 256 กิโลไบต์ (KB) เซนเซอร์แสงธรรมชาติแบบแอนะล็อกที่ใช้โฟโตไดโอด (photodiode) BPW21 ต่อขนาดด้วยตัวต้านทานขนาด 1.3 กิโลโอห์ม มีความไว (sensitivity) 166 มิลลิโวลต์ต่อลักซ์ โมดูลนาฬิกา DS3231 มีความแม่นยำ ± 2 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ณ ช่วงอุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 1 แผนภาพส่วนประกอบของระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ

1. อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดิน

อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินใช้กำหนดการให้น้ำหรือหยุดรดน้ำ ประกอบขึ้นจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ยาว 900 มิลลิเมตร ด้านหัวและท้ายของท่อต่อเข้ากับข้อต่อเกลียวใน (ภาพที่ 2 (ก)) ส่วนปลายท่อด้านหนึ่งเป็นตัวยึดท่อแบบเกลียวนอก (ภาพที่ 2 (ข)) เจาะรูทะลุใส่ท่อพลาสติก (ใส่ปากกา) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2 (ค)) สายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 4 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร สวมประกอบเข้ากับท่อพลาสติก (ภาพที่ 2 (ง)) กระเปาะพรุนดินขาวเป็นส่วนที่ดัดแปลงจากอุปกรณ์รดน้ำต้นไม้ (ภาพที่ 2 (จ)) เป็นทางผ่านเข้าออกของน้ำในท่อจึงทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศภายในท่อที่แสดงปริมาณความชื้นในดินที่อยู่ในรูปของพลังงานความดันของน้ำในดิน เซนเซอร์ความดันจะถูกต่อเข้ากับท่อพลาสติกด้วยสายยางซิลิโคน (ภาพที่ 2 (ฉ)) เพื่อส่งแรงดันไฟฟ้าในฟังก์ชันของพลังงานความดันของน้ำในดินไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน



ภาพที่ 2 ผังการประกอบอุปกรณ์วัดแรงตึงน้ำของดิน ประกอบด้วย ท่อพีวีซี (ก) ตัวอุดท่อแบบเกลียวนอก (ข) ใส่ปากกา (ค) สายยางซิลิโคน (ง) กระเปาะพรุนดินขาว (จ) และสายยางซิลิโคน (ฉ)

เซนเซอร์ความดันเบอร์ ADP5100 วัดความดันช่วง ± 100 กิโลปาสกาล มีความแม่นยำโดยรวมร้อยละ ± 1.25 ของค่าเต็มสเกล (%FS) ณ แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 5 โวลต์ ให้แรงดันไฟฟ้าในฟังก์ชันของความดัน 500 ± 5 มิลลิโวลต์ ที่ความดัน -100 กิโลปาสกาล และ $2,500 \pm 5$ มิลลิโวลต์ ที่ความดัน 0 กิโลปาสกาล (Panasonic industry, 2023) ดังนั้นความดันผิดพลาดของเซนเซอร์ความดันจะมีค่า ± 0.25 กิโลปาสกาล ความไวของเซนเซอร์เป็นแบบเชิงเส้นดังภาพที่ 3 การคำนวณความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับความดันด้วยสมการ (1)

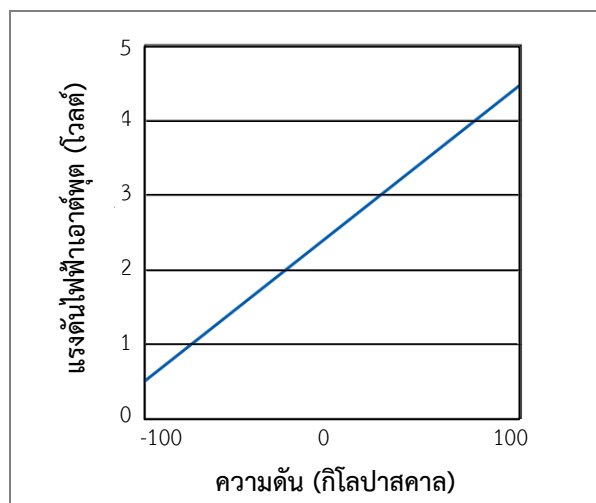
$$V = mP + b \quad (1)$$

กำหนดให้ V คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

P คือ ความดัน

m คือ ความชัน โดยที่ $m = \Delta V / \Delta P = (2,500 - 500) / (0 - (-100)) = 20$

b คือ จุดตัดแกนของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ณ ความดัน 0 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซนเซอร์ความดัน ที่มา: Panasonic industry (2023)

จากภาพที่ 3 มีค่า 2,500 มิลลิโวลต์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับความดัน

$$V = 20P + 2,500 \quad (2)$$

จะได้สมการ (3) สำหรับคำนวณความดันซึ่งเป็นค่าพลังงานความดันของน้ำในดิน คือ

$$P = \frac{V - 2,500}{20} \quad (3)$$

2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

2.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องสูบน้ำ

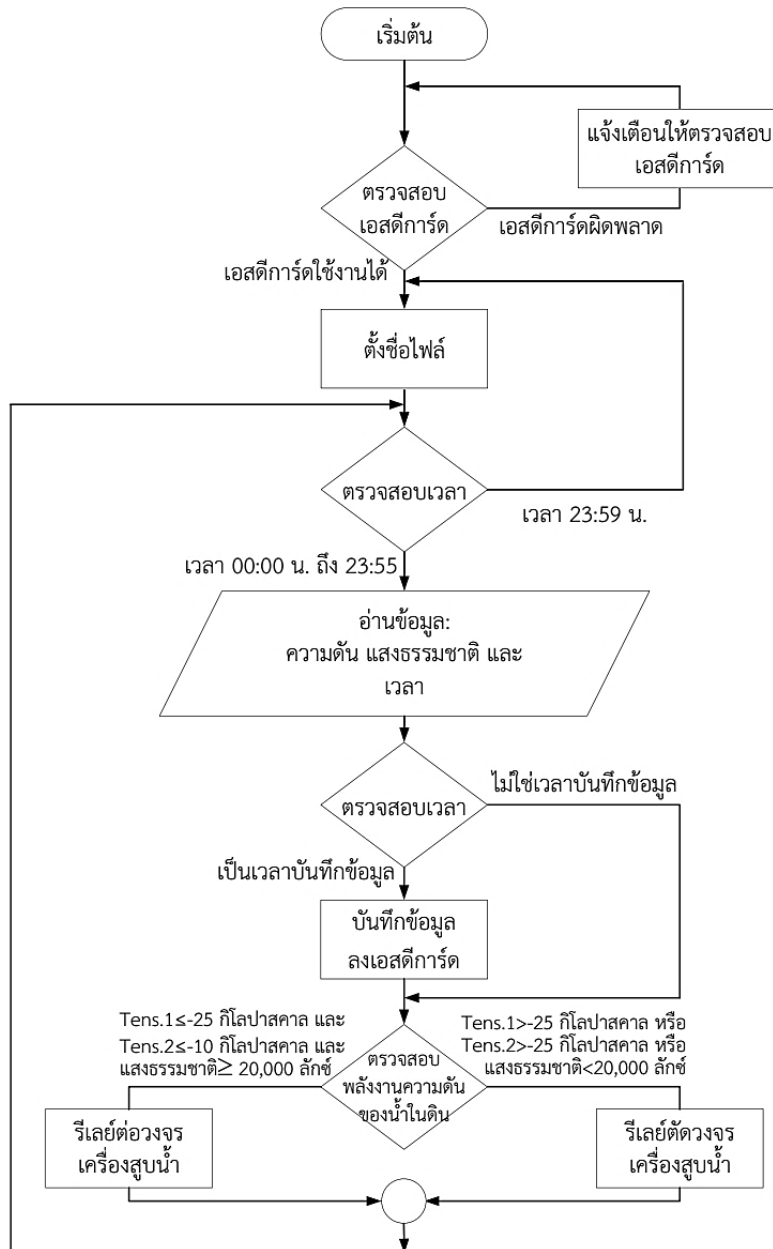
แบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ 180 วัตต์ สูบน้ำได้ 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องสูบน้ำเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 200 วัตต์ 18.6 โวลต์ (operating voltage)

2.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบควบคุม

ได้แก่ บอร์ดอาดูโน เมกา 2560 เซนเซอร์ และอุปกรณ์ประกอบ เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 วัตต์ ประจุพลังงานผ่านตัวควบคุม การประจุลงแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 12 โวลต์ 5.5 แอมป์ชั่วโมง แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกติดตั้งเอียง 15 องศา หันหน้าแผงไปด้านทิศใต้เพื่อให้มีโอกาสรับแสงอาทิตย์ได้ในช่วงกลางวัน

3. รายละเอียดด้านเฟิร์มแวร์

เฟิร์มแวร์ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติมีผังงานดังภาพที่ 4 ประกอบด้วย ฟังก์ชันตรวจสอบเอสดีการ์ด ตั้งชื่อไฟล์และตรวจสอบเวลา อ่านค่าเซนเซอร์ความดันและแสงธรรมชาติ บันทึกข้อมูล และฟังก์ชันควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องสูบน้ำจะทำงานเมื่ออุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 1 (Tens.1) อ่านค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ -25 กิโลปาสคาล และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 2 (Tens.2) อ่านค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 กิโลปาสคาล และปริมาณแสงธรรมชาติสูงกว่า 20,000 ลักซ์ ซึ่งเป็นระดับขั้นต่ำ ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับเครื่องสูบน้ำ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเก็บบันทึกวัน เวลา ค่าพลังงานความดันของน้ำในดิน ปริมาณแสงธรรมชาติ และสถานการณ์ทำงานของเครื่องสูบน้ำ ไฟล์ข้อมูลเป็นไฟล์รายวัน และบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ในช่วงเวลา 00.00 น. ถึง 23.55 น.

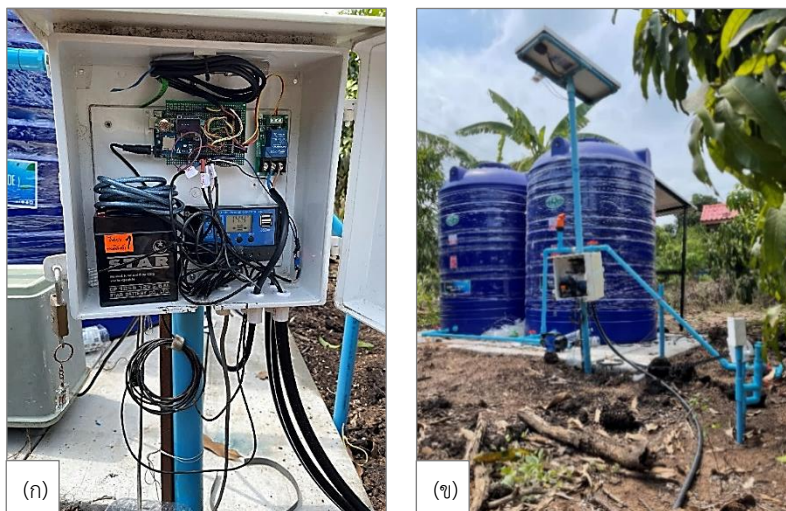


ภาพที่ 4 การทำงานของระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ

4. การติดตั้งระบบให้น้ำอัตโนมัติ

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติถูกติดตั้งทดสอบในสวนมะม่วง ตำบลปากน้ำ อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ดังภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในสวน โดยหน่วยงานรับตรวจวิเคราะห์ดินแห่งหนึ่ง พบว่าเนื้อดินจัดอยู่ในประเภทเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ร้อยละ 14 31 และ 55 ตามลำดับ อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินถูกฝังห่างจากโคน

ต้นมะม่วงประมาณ 90 เซนติเมตร เขตชั้นรากของมะม่วงมีความลึกประมาณ 90 เซนติเมตร อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 1 ถูกฝังให้ลึกจากผิวดิน 22.5 เซนติเมตร หรือระดับ 1/4 ของเขตชั้นราก และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 2 ถูกฝังให้ลึกจากผิวดิน 67.5 เซนติเมตร หรือระดับ 3/4 ของเขตชั้นราก



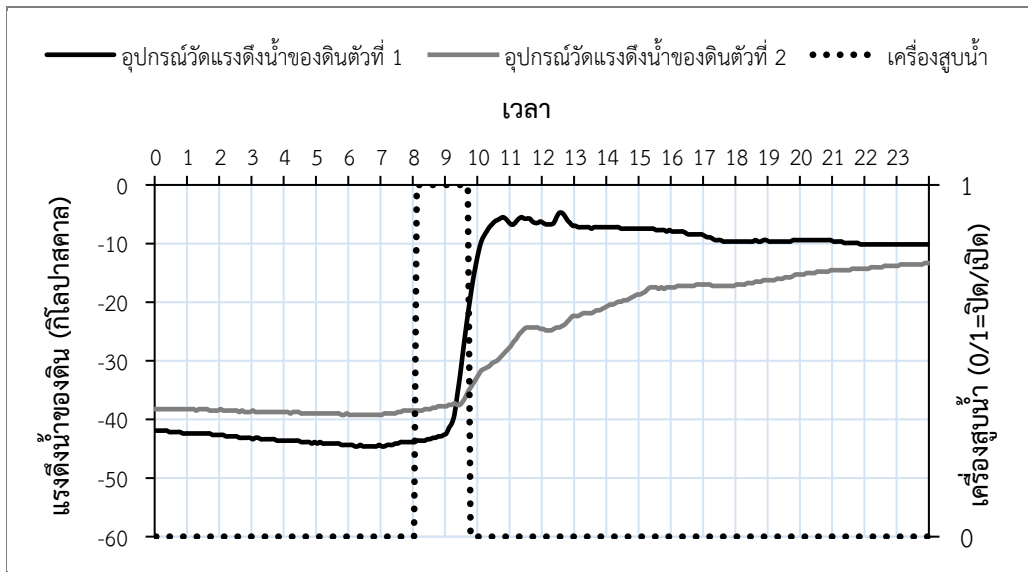
ภาพที่ 5 แผงวงจรระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ (ก) และระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ (ข)

ผลการวิจัย

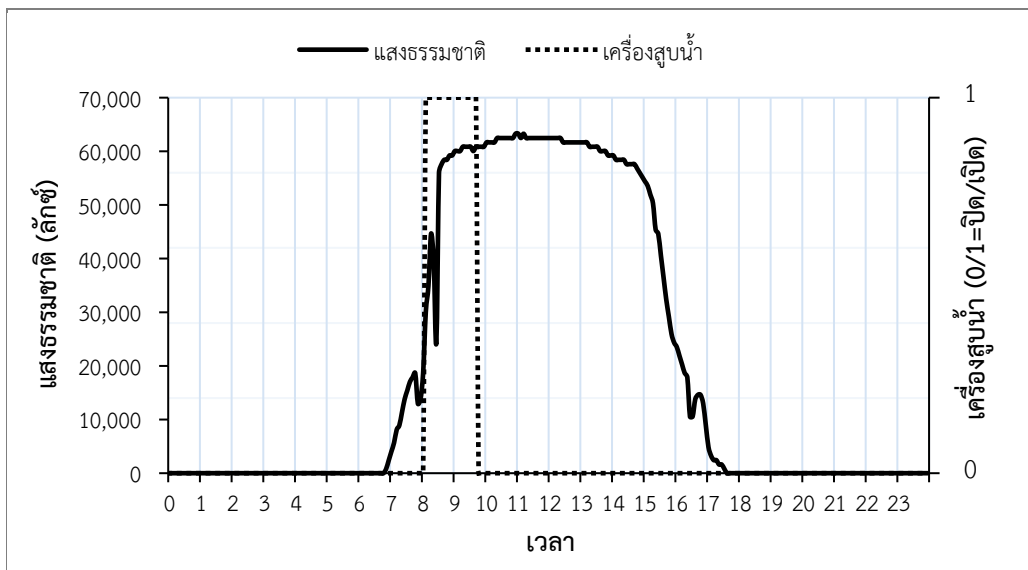
ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติทำงานด้วยเฟิร์มแวร์ที่มีผังงานดังภาพที่ 4 ถูกทดสอบเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 พบว่าระบบสามารถเริ่มให้น้ำต้นมะม่วงเมื่ออุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 1 วัดค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้ต่ำกว่า -25 กิโลปาสกาล และเครื่องวัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ 2 วัดค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้ต่ำกว่า -10 กิโลปาสกาล และปริมาณแสงธรรมชาติมากกว่า 20,000 ลักซ์ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้

ข้อมูลการทดสอบเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 พบว่าแสงธรรมชาติเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 06.50 น. แม้ว่าระดับพลังงานความดันของน้ำในดินที่ความลึก 1/4 และ 3/4 ของเขตชั้นรากมีค่าต่ำกว่า -30 กิโลปาสกาล ซึ่งแสดงว่าดินโดยรอบกระเปาะพรุนดินขาวมีสภาพแห้ง แต่เครื่องสูบน้ำยังไม่ทำงานเนื่องจากแสงธรรมชาติอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 20,000 ลักซ์ เมื่อปริมาณแสงธรรมชาติเพิ่มขึ้นโดยลำดับ จนกระทั่งเวลา 08.05 น. ปริมาณแสงธรรมชาติเริ่มมีค่ามากกว่า 20,000 ลักซ์ ระบบจึงเริ่มให้น้ำแก่ต้นมะม่วง ในขณะนั้นพลังงานความดันของน้ำในดินที่ระดับความลึก 1/4 ของเขตชั้นราก มีค่า -43.62 กิโลปาสกาล และระดับ 3/4 ของเขตชั้นรากมีค่า -38.49 กิโลปาสกาล น้ำจะไหลซึมลงไปในชั้นดินถึงระดับความลึก 1/4 ของเขตชั้นรากก่อน จึงทำให้เส้นโค้งพลังงานความดันของน้ำในดินมีความชันมากกว่าเส้นโค้งพลังงานความดันของน้ำในดินที่ความลึก 3/4 ของเขตชั้นราก เครื่องสูบน้ำทำงานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 35 นาที (08.05 น. ถึง 09.40 น.) แล้วหยุดทำงานเมื่อค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ความลึก 1/4 เพิ่มขึ้นกระทั่งมีค่าสูงกว่า -25 กิโลปาสกาล หลังจากนั้นน้ำจึงไหลซึม

ลงไปในพื้นที่ดินถึงระดับ 3/4 ของเขตชั้นราก ทำให้มีค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ -25 กิโลปาสกาล โดยใช้เวลาอีก 1 ชั่วโมง 40 นาที (09.40 น. ถึง 11.20 น.) ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7



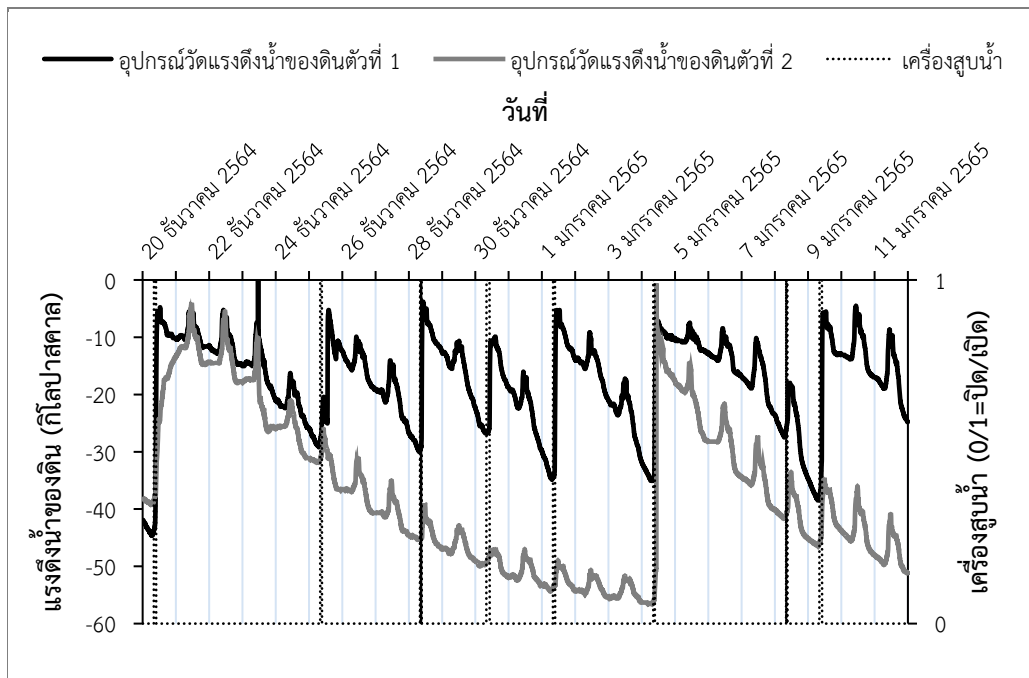
ภาพที่ 6 การทำงานของระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติ เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564



ภาพที่ 7 แสงธรรมชาติและสถานะการทำงานของเครื่องสูบน้ำ เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นถูกทดสอบระหว่างวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2565 ได้ข้อมูลพลังงานความดันของน้ำในดินและการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ดังภาพที่ 8 เส้นกราฟแสดงถึงการตอบสนองของระบบที่มีต่อการสูญเสียในดินเมื่อพืช

ดึงน้ำไปใช้และการระเหยตามธรรมชาติ เครื่องสูบน้ำจะทำงานเมื่อค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ระดับความลึก 1/4 ของเขตชั้นรากมีระดับพลังงานความดันมากกว่า -25 กิโลปาสคาล และที่ระดับความลึก 3/4 ของเขตชั้นรากมีระดับพลังงานความดันต่ำกว่า -10 กิโลปาสคาล ระหว่างการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 23 วันดังกล่าวข้างต้น พบว่าเครื่องสูบน้ำทำงานจำนวน 8 ครั้ง รวมเวลาได้ 11 ชั่วโมง 25 นาที คิดเป็นชั่วโมงทำงานร้อยละ 6.20 ของเวลากลางวันในช่วงที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 8 กราฟพลังงานความดันของน้ำในดินและสถานการณ์ทำงานของเครื่องสูบน้ำ

รายละเอียดสภาพดินบริเวณต้นมะม่วงที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินที่จำแนกตามค่าพลังงานความดันของน้ำในดิน จากข้อมูลการทดสอบในระหว่างวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2565 เฉพาะช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. พบว่าดินที่ระดับความลึก 1/4 ของเขตชั้นรากมีสภาพเป็นดินแฉะร้อยละ 15.98 ดินเปียกร้อยละ 77.11 และดินแห้งร้อยละ 6.91 สำหรับดินที่ระดับความลึก 3/4 ของเขตชั้นรากมีสภาพเป็นดินแฉะร้อยละ 1.64 ดินเปียกร้อยละ 29.21 ดินแห้งร้อยละ 49.86 และดินแห้งมากร้อยละ 19.29 โดยเฉลี่ยดินมีสภาพเปียกร้อยละ 53.16 และรองลงมามีสภาพดินแห้งเฉลี่ยร้อยละ 28.38 ดังข้อในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลพลังงานความดันของน้ำในดินและสภาพของดินบริเวณต้นมะม่วง

พลังงานความดันของน้ำในดิน (สภาพของดิน)	ระดับความลึก (ร้อยละ)		
	ระดับ 1/4 ของเขตชั้นราก	ระดับ 3/4 ของเขตชั้นราก	ค่าเฉลี่ย
0 ถึง -10 กิโลปาสกาล (ดินแฉะ)	15.98	1.64	8.81
น้อยกว่า-10 ถึง -30 กิโลปาสกาล (ดินเปียก)	77.11	29.21	53.16
น้อยกว่า-30 ถึง -50 กิโลปาสกาล (ดินแห้ง)	6.91	49.86	28.38
น้อยกว่า-50 กิโลปาสกาล (ดินแห้งมาก)	0	19.29	9.64

การอภิปรายผลการวิจัย

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถให้น้ำและรักษาค่าพลังงานความดันของน้ำในดินที่ระดับความลึก 1/4 ถึง 3/4 ของเขตชั้นรากให้อยู่ในช่วง -10 ถึง -30 กิโลปาสกาล เฉลี่ยร้อยละ 53.16 ของช่วงเวลากลางวันในระหว่างวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2565 ระบบให้น้ำอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในดินได้เมื่ออุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ฝังดินที่ระดับความลึก 1/4 อ่านค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ -25 กิโลปาสกาล และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินตัวที่ฝังดินที่ระดับความลึก 3/4 อ่านค่าพลังงานความดันของน้ำในดินได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 กิโลปาสกาล และปริมาณแสงธรรมชาติสูงกว่า 20,000 ลักซ์ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ออกแบบเฟิร์มแวร์ ตลอดระยะเวลาการทดสอบจำนวน 23 วัน ระบบให้น้ำต้นมะม่วงจำนวน 8 ครั้ง ซึ่งรวมเวลาที่เครื่องสูบน้ำทำงานได้ 11 ชั่วโมง 25 นาที หรือคิดเป็นชั่วโมงทำงานร้อยละ 6.20 ของเวลากลางวันในช่วงทำการทดสอบ ระบบให้น้ำอัตโนมัติที่ใช้เทคนิคดังกล่าวยังให้ความเชื่อมั่นว่าช่วยประหยัดน้ำ (Rajan *et al.*, 2016) และให้น้ำในปริมาณที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากที่สุด เมื่อควบคุมค่าพลังงานความดันของน้ำในดินให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง -10 ถึง -30 กิโลปาสกาล (สุนทร และคณะ, 2560) โดยภาพรวมแล้วระบบให้น้ำพืชแบบอัตโนมัติยังช่วยทำให้เกิดความยั่งยืนและลดผลกระทบ 3 ด้าน คือ ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การปกป้องระบบนิเวศน์ การอนุรักษ์น้ำ และลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ด้านเศรษฐกิจ เช่น การลดต้นทุนบริหารจัดการ การเพิ่มผลผลิต และการประหยัดค่าน้ำ เป็นต้น และด้านสังคม เช่น การใช้ที่ดินอย่างคุ้มค่าโดยให้ผลผลิตสูงทำให้เกิดความมั่นคงทางอาหาร (Obaideen *et al.*, 2022)

สรุปผลการวิจัย

ระบบให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดินถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน เมกา 2560 เป็นตัวประมวลผลข้อมูลความชื้นในดินที่อยู่ในรูปของพลังงานความดันของน้ำในดิน ฟังก์ชันการให้น้ำต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติอาศัยอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของดินและเซนเซอร์แสงธรรมชาติ เป็นสัญญาณอินพุตให้ตัวประมวลผลสั่งงานเครื่องสูบน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ การทดสอบระบบพบว่าระบบให้น้ำอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันที่ออกแบบเฟิร์มแวร์ไว้ โดยจะรักษาระดับแรงดันน้ำของดินให้อยู่ในช่วง -10 ถึง -30 กิโลปาสกาลที่ระดับความลึก 1/4 ถึง 3/4 ของเขตชั้นรากโดยเฉลี่ยร้อยละ 53.16 มีสภาพเป็นดินเปียกซึ่งมี

ปริมาณน้ำที่เพียงพอที่รากพืชสามารถดูดน้ำในดินไปใช้ได้ ในช่วงเวลา 23 วัน ที่ทำการทดสอบพบว่า เครื่องสูบน้ำทำงานเพียงร้อยละ 6.20 ของเวลากลางวันในช่วงที่ทำการทดสอบ ดังนั้นระบบให้น้ำ ต้นมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการวัดพลังงานความดันของน้ำในดินจึงสามารถนำไปใช้ในการรดน้ำ ต้นมะม่วงได้ โดยใช้น้ำอย่างประหยัด และให้น้ำเพียงพอต่อการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ของต้นมะม่วง

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นผลการวิจัยส่วนหนึ่งของการวิจัย เรื่อง การพัฒนาระบบเกษตรแม่นยำเพื่อเพิ่มผลผลิตมะม่วงที่ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

- กรณิการ์ มูลโพธิ์. (2563). ระบบรดน้ำพืชอัตโนมัติด้วยสมาร์ตโฟนโดยใช้ NETPIE. *Engineering Transactions*, 23(1), 58-66.
- ณัฐฤทธิศักดิ์ ปัทมะ. (2563). การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะของประเทศไทย. *สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา*, 10(9), 1-19.
- ปราโมทย์ ไม่กล้าด. (2557). *ทางออกการบริหารจัดการน้ำของไทย*. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2566, จาก: <https://tdri.or.th/water/thaipublica20140309/>.
- พรทิพย์ กัญญา ฐิติรัตน์ สีสมาน กฤตณัย เจียมเกาะ ปฏิพัทธ์ สีคำแสน ปภาณ ไชยสงคราม พิพัฒน์ ไกลมณี และอุมาพร บ่อพิมาย. (2565). การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะ. *Industrial Technology Journal*, 7(1), 33-45.
- สมเกียรติ ตั้งกิจวานิชย์. (2565). *คิดยกกำลังสอง: ปรับสู่เกษตรแม่นยำ...ใช้น้ำสร้างมูลค่า*. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2566, จาก: https://tdri.or.th/2022/04/thinkx_445/.
- สุนทรียัง ชัชวาลย์ พรชัย ไพบูลย์ และพรณี ชื่นนคร. (2560). *เครื่องวัดแรงดึงน้ำของดิน*. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2566, จาก: <https://www.cab.kps.ku.ac.th/plantbiophysics/pdf/60TensiometerSimpleExplain.pdf>.
- เสกสรรค์ ศาสตร์สถิต และเกสร กาลจิตร์. (2565). *ระบบการให้น้ำพืชอัตโนมัติ*. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2566, จาก: <https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/automatic-watering-system.html>.
- Akhter, M.O., Shaukat, F., Husain, N. and Arfeen, Z.A. (2022). Exposure to auto-irrigation system of Pakistan using solar PV power. *Journal of Xi'an Shiyu University, Natural Science Edition*, 18(7), 318-323.
- Obaideen, K., Yousef, B.A.A., AlMallahi, M.N., Tan, Y.C., Mahmoud, M., Jaber, H. and Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>.
- Panasonic industry. (2023). *Pressure sensor*. Retrieved 16 October 2024, from: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ADE8000/ast-ind-266903.pdf>.

- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D.K., Sudhishri, S., Bhatia, A. and Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100032, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100032>.
- Rajan, B., Sanjay, A. and Chew, C.C. (2016). Improving irrigation water productivity using tensiometers. *Journal of Soil and Water Conservation*, 15(2), 120-124.

**การทดสอบคุณภาพผ้าสีธรรมชาติที่ย้อมด้วยสีผงจากเปลือกฝักโกโก้
(*Theobroma cacao*) โดยการใช้สารช่วยติดสี
Quality Testing of Naturally Dyed Fabric Using Powdered Dye
from Cocoa Pod Husks (*Theobroma cacao*)
with the Application of Mordants**

จutiporn อัสวาวรรณ¹ วีระเกียรติ ทรัพย์มี² และจุฑามาศ ศุภพันธ์^{1*}
Jutiporn Assawasowan¹, Verakiat Supmee² and Juthamas Suppapan^{1*}

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตและการแปรรูปโกโก้มีส่วนของเปลือกฝักโกโก้ที่เป็นส่วนเหลือทิ้งซึ่งสามารถนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ได้ การศึกษานี้มีการนำเปลือกฝักโกโก้มาสกัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยเกลือเพื่อทำเป็นสีผงสำหรับนำไปย้อมผ้าสีธรรมชาติ จากนั้นนำสีผงมาทดสอบการย้อมผ้าด้วยวิธีการทำผ้ามัดย้อม การหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ (eco-print) และการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า โดยใช้สารส้ม น้ำปูนใส และเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งนิยมใช้ในการทำผ้าสีธรรมชาติเป็นสารช่วยติดสี ผลการศึกษาพบว่าในกระบวนการผลิตสีผงสามารถผลิตสีผงได้ร้อยละ 26.29 ของน้ำหนักเปลือกฝักโกโก้เริ่มต้น เมื่อนำไปทดสอบคุณภาพการย้อมสีด้วยการวิเคราะห์ค่าสี (L^* a^* และ b^*) และค่าความเข้มสี พบว่าสามารถไล่เฉดสีในการย้อมผ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลแก่ และสีเทาปนดำ ด้วยการใช้สารช่วยติดสี คือ สารส้ม น้ำปูนใส และเฟอร์รัสซัลเฟต ตามลำดับ ผลการทดสอบคุณภาพผ้าสีธรรมชาติที่ได้จากการย้อมโดยการใช้สารส้มและน้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสีพบว่ามีความคงทนต่อการซักล้าง น้ำ เหงื่อ แสงแดดเทียม และการขัดถูในระดับปานกลางถึงดีของการย้อมผ้าแต่ละวิธี ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีพบว่ามีความคงทนในระดับที่ดีที่สุดในการย้อมผ้าทุกวิธี การศึกษานี้สรุปว่าการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ที่สกัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยเกลือในการทำผ้าสีธรรมชาติเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อนำส่วนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตโกโก้มาใช้ประโยชน์ได้

คำสำคัญ: โกโก้ สีผง สารช่วยติดสี ย้อมผ้า

¹ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* Corresponding author e-mail: jutamas_sup@nstru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.264813>

Received: 25 September 2024, Revised: 5 November 2024, Accepted: 6 November 2024

Abstract

In cocoa production and processing, cocoa pod husks are considered waste, but they can be developed for beneficial use. This study extracted cocoa pod husks using salt precipitation method to create a powder dye for natural fabric dyeing. The dye powder underwent testing for fabric dyeing using tie-dye techniques, color padding in eco-printing, and dyeing cotton yarn for weaving. Potassium alum, limewater, and ferrous sulfate, commonly used as mordants in natural fabric dyeing, were utilized to help fix the color. The study found that the dye powder production process yielded 26.29% of the initial weight of the cocoa pod husks. When the dye quality was tested by analyzing the color values (L^* , a^* , b^*) and color strength, it was found that the dyeing process could produce shades of light brown, dark brown, and grayish-black using alum, limewater, and ferrous sulfate as mordants, respectively. The test results for the quality of naturally dyed fabrics showed that using alum and limewater as mordants provided moderate to good durability against washing, water, sweat, artificial sunlight, and rubbing for each dyeing method. Using ferrous sulfate as a mordant provided the highest level of durability in all fabric dyeing methods. This study concludes that using dye powder extracted from cocoa pod husks through salt precipitation for natural fabric dyeing offers a viable approach to utilizing waste from the cocoa production process.

Keywords: Cocoa, Powder dye, Mordant, Fabric dyeing

บทนำ

โกโก้ (*Theobroma cacao*) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นอาหารได้หลายชนิด (สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร, 2564) การแปรรูปส่วนใหญ่จะนำมาผลิตเป็นช็อกโกแลต ส่วนของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นช็อกโกแลต คือ ส่วนเนื้อและเมล็ดที่เข้าสู่กระบวนการแปรรูป โดยในกระบวนการแปรรูปจะมีส่วนเหลือทิ้งจำนวนมาก คือ เปลือกของฝักโกโก้ การนำเปลือกฝักโกโก้ที่เหลือไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันคือการนำไปผลิตเป็นปุ๋ยหมักซึ่งไม่สามารถเพิ่มมูลค่าได้มาก ปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกโกโก้รายใหญ่จะมีธุรกิจร้านจำหน่ายผลิตภัณฑ์และเครื่องดื่มโกโก้ควบคู่กันไปด้วย โดยส่วนใหญ่ผู้ประกอบการจะมีโรงงานผลิตและร้านจำหน่ายอยู่ในบริเวณเดียวกัน ซึ่งนอกจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากโกโก้แล้วยังมีการจัดกิจกรรมให้ลูกค้าเที่ยวชมสวนโกโก้และมีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตช็อกโกแลตหรือมีกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นการพัฒนาส่วนเหลือทิ้งจากเปลือกฝักโกโก้เพื่อใช้ในกิจกรรมส่งเสริมการขาย การนำไปใช้ในการผลิตสีย้อมผ้า (อรจิรา และชุตินา, 2567) จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจนอกจากจะช่วยลดส่วนเหลือทิ้งแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าการผลิตโกโก้อีกด้วย

ปัจจุบันความนิยมในการใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติมีความนิยมเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จากผ้าที่มีการใช้สีธรรมชาติในการย้อมซึ่งมีความปลอดภัย ไม่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก

และสามารถย่อยสลายได้ง่าย (ระมัด, 2556; ศรีนทร์ และคณะ, 2554) แต่ในกระบวนการย้อมสีจากธรรมชาติมีขั้นตอนในการผลิตที่ยุ่งยาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการเตรียมสีซึ่งต้องมีการจัดการวัตถุดิบก่อนทำการสกัดสีและเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานาน ดังนั้นการผลิตสีย้อมเป็นสีผงก่อนที่จะนำมาใช้ในงานย้อมสีธรรมชาติจะเป็นการลดขั้นตอนดังกล่าวทำให้สามารถใช้งานได้ทันที อีกทั้งเก็บไว้ใช้งานได้นาน และมีความสะดวกต่อการใช้งานในแต่ละครั้ง แต่อย่างไรก็ตามสีผงที่ได้มีข้อจำกัดหลายอย่างในการใช้งานจึงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติในการย้อมติดสีเพื่อนำไปใช้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณภาพสีผงจากเปลือกฝักโกโก้ที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยการตกตะกอนด้วยเกลือซึ่งเป็นวิธีที่ผู้ประกอบการสามารถผลิตเป็นสีผงได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ โดยนำมาทดสอบกับการใช้ในกิจกรรมการทำผ้าสีธรรมชาติ ได้แก่ การทำผ้ามัดย้อม การท้อมสีในการผลิตผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ (eco-print) และการนำไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า โดยใช้สารช่วยติดสีที่นิยมใช้ในการทำผ้าสีธรรมชาติเป็นสารช่วยย้อม ได้แก่ สารส้ม (potassium alum) น้ำปูนใส (calcium hydroxide) และเฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulfate) ซึ่งสารช่วยติดสี (mordant) เป็นตัวที่ช่วยให้สีติดอยู่บนผ้าและเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ สีไม่ตกง่าย อีกทั้งสารช่วยติดสีแต่ละชนิดยังส่งผลให้เกิดสีที่แตกต่างกันอีกด้วย เช่น ทำให้สีสว่างหรือเข้มขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยการไล่เฉดสีให้มีความหลากหลายมากขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้เพื่อหาแนวทางความเป็นไปได้ในการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จากผ้าสีธรรมชาติสำหรับใช้ในกิจกรรมส่งเสริมธุรกิจโกโก้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตสีผงจากเปลือกฝักโกโก้จากการแปรรูปโกโก้

ผลิตสีผงจากเปลือกฝักโกโก้โดยดัดแปลงตามวิธีของไพรัตน์ และคณะ (2557) ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ โดยทำการผลิตจากน้ำสีจากเปลือกฝักโกโก้ ใช้อัตราส่วนเปลือกฝักโกโก้ 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 5 ลิตร นำไปต้มโดยควบคุมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองน้ำสีแล้วนำไปต้มต่อที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ให้เหลือน้ำสี 2 ลิตร แล้วปล่อยให้สีเย็นเพื่อนำไปทำสีผงต่อไป ทำน้ำสีให้เป็นสีผงโดยใช้สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ ด้วยการนำน้ำสีที่สกัดได้ผสมกับสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากันและปล่อยให้แห้งให้ตกตะกอน แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้ตกตะกอนอีกครั้งโดยใช้ความเร็วรอบ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำน้ำสีไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนแห้ง นำสีที่ได้บนกระดาษกรองไปบดเป็นผงเพื่อนำไปทดสอบการใช้งานต่อไป

2. การทดสอบคุณภาพสีผงโดยการทำผ้ามัดย้อม

นำผ้าฝ้ายดิบขนาด 30 x 30 เซนติเมตร มาทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานยี่ห้อซันไลต์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร นาน 10 นาที เพื่อขจัดคราบไขมัน ทำการย้อมโดยใช้สีผงความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยกระบวนการย้อมสีเริ่มต้นเมื่อสารละลายมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 10 นาที แล้วควบคุมอุณหภูมิการย้อมสีไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำผ้าที่ย้อมสีเสร็จแล้วมาย้อมสารช่วยติดสีปริมาตร 2 ลิตร โดยใช้สารช่วยติดสีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม น้ำปูนใส และเฟอร์รัสซัลเฟต ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนสารช่วยติดสีต่อน้ำ 1:10 แล้วล้างด้วยน้ำอุ่นปริมาตร 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

5 นาที และตากผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วนำไปวัดค่าสี ความเข้มสี และทดสอบความคงทนของสี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 5 ซ้ำ และใช้ผ้าดิบเป็นชุดควบคุม

3. การทดสอบสีผงโดยการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ

เตรียมผ้าโดยใช้ผ้าฝ้ายดิบขนาด 30 x 30 เซนติเมตร เคลือบสารช่วยติดสีสูตรปูนธรรมชาติโดยแช่ผ้าในสารช่วยติดสีสูตรปูนธรรมชาติปริมาตร 2 ลิตร สำหรับทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติจำนวน 2 ชั่วโมง และนำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม เตรียมใบไม้ นำมาทำความสะอาดล้างน้ำเปล่าและผึ่งลมนาน 30 นาที ให้พอหมาดก่อนนำมาใช้วางบนผ้าที่เคลือบสารช่วยติดสีสูตรปูนธรรมชาติแล้ว เตรียมสีย้อมปริมาตร 2 ลิตร เพื่อนำมาใช้ในการหม่สี โดยใช้สีผงความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 ลิตร หลังจากนั้นนำผ้าขาวมาชุบน้ำสีและใช้สารช่วยติดสีปริมาตร 2 ลิตร โดยใช้สารช่วยติดสีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายสารส้มความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร น้ำปูนใส ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และสารละลายเพอร์สซัลเฟตความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร นำมาวางทับบนผ้าที่วางใบไม้ แล้วม้วนผ้าด้วยแกนไม้ไผ่ ใช้เชือกมัดให้แน่นตลอดแนว จากนั้นนำผ้าไปนึ่งโดยใช้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำผ้าออกจากแกนม้วนแล้วล้างด้วยน้ำอุ่นปริมาตร 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วนำไปวัดค่าสี ความเข้มสี และทดสอบความคงทนของสี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 5 ซ้ำ และใช้ผ้าดิบเป็นชุดควบคุม

4. การทดสอบสีผงโดยการนำไปย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า

เตรียมสีย้อมปริมาตร 5 ลิตร เพื่อนำมาใช้ในการย้อมเส้นด้ายน้ำหนัก 1 กิโลกรัม โดยใช้สีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร นำเส้นด้ายฝ้ายที่ทำความสะอาดแล้วลงย้อมในน้ำสีนาน 1 ชั่วโมง พลิกเส้นด้ายให้ถูกน้ำย้อมเสมอกันทุก ๆ 10 นาที โดยกระบวนการย้อมสีเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 องศาเซลเซียส ภายใน 10 นาที แล้วควบคุมอุณหภูมิการย้อมสีไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเส้นด้ายที่ย้อมสีเสร็จแล้วมาย้อมสารช่วยติดสีปริมาตร 2 ลิตร โดยใช้สารช่วยติดสีจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายสารส้ม น้ำปูนใส และสารละลายเพอร์สซัลเฟตความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร แล้วล้างด้วยน้ำอุ่นปริมาตร 10 ลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วนำไปวัดค่าสี ความเข้มสี และทดสอบความคงทนของสี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 5 ซ้ำ โดยใช้ผ้าขาวที่ทอจากเส้นด้ายที่ไม่มีการย้อมเป็นชุดควบคุม

5. การวัดค่าสีและความเข้มสี

การค่าสี (L^* a^* และ b^*) และความเข้มสี (color strength หรือ K/S) โดยใช้เครื่อง Datascolor 850 ซึ่งการวัดค่าความเข้มสีใช้เทคนิคการวัดการสะท้อนของแสงและแสดงในรูปของ K/S ตามสมการของ Kubelka - Munk โดยค่า K/S มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสง (R) ตามสมการ (1) (Kokhanovsky, 2007)

$$K/S = (1-R)^2/2R \quad (1)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (coefficient of absorption)

S คือ สัมประสิทธิ์ของการกระจายแสง (coefficient of scatter)

และ R คือ ค่าการสะท้อนแสง (reflectance)

6. การทดสอบความคงทนของสี

นำผ้าที่ผ่านการย้อมด้วยสีผงมาทดสอบความคงทนของสีเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อผ่านกิจกรรมต่าง ๆ โดยใช้เกณฑ์การตรวจสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังนี้

- 1) ทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง (color fastness to washing) ตามมาตรฐานการทดสอบ International Standard (ISO 105-C06) (2010)
- 2) ทดสอบความคงทนของสีต่อน้ำ (color fastness to water) ตามมาตรฐานการทดสอบ International Standard (ISO 105-E01) (2010)
- 3) ทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ (color fastness to perspiration) ตามมาตรฐานการทดสอบ International Standard (ISO 105-E04) (2013)
- 4) ทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (color fastness to light) ตามมาตรฐานการทดสอบ International Standard (ISO 105-B02) (1994)
- 5) ทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู (color fastness to rubbing) ตามมาตรฐานการทดสอบ International Standard (ISO 105-E01) (2010)

7. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลของแต่ละวิธีการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) เมื่อพบว่ามีความแตกต่างทางสถิติทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

1. การผลิตสีผงจากเปลือกฝักโกโก้

การผลิตสีผงจากเปลือกฝักโกโก้โดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยเกลือเมื่อใช้น้ำหนักเปลือกฝักโกโก้เริ่มต้น 1 กิโลกรัม จะผลิตสีผงได้น้ำหนัก 262.96 กรัม คิดเป็นร้อยละ 26.29 ของน้ำหนักเปลือกฝักโกโก้เริ่มต้น ดังภาพที่ 1

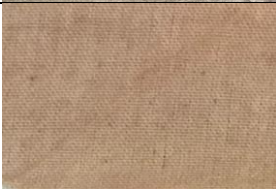


ภาพที่ 1 สีผงจากเปลือกฝักโกโก้

2. การทดสอบสีผงโดยการทำผ้ามัดย้อม

ผลการทดสอบความเข้มสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการทำผ้ามัดย้อม พบว่าค่าความเข้มสีจากการย้อมด้วยการใช้เฟอร์สซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีมีค่าความเข้มสีมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำปูนใส และสารส้ม โดยมีค่าเท่ากับ 9.147 3.589 และ 2.471 ตามลำดับ ซึ่งแต่ละสารช่วยติดสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการวัดค่าสีพบว่าการใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน การใช้ปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลเข้ม และการใช้เฟอร์สซัลเฟตให้โทนสีผ้าเป็นสีเทาเข้ม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบค่าสีและความเข้มสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการทำผ้ามัดย้อม

สารช่วยติดสี	ค่าสี			ค่าความเข้มสี	ตัวอย่างสีผ้า
	L*	a*	b*		
ชุดควบคุม	94.589 ^a	0.512 ^c	8.712 ^c	0.131 ^d	
สารส้ม	60.028 ^b	24.422 ^b	23.028 ^a	2.471 ^c	
น้ำปูนใส	52.218 ^c	26.280 ^a	10.692 ^b	3.589 ^b	
เฟอร์สซัลเฟต	32.827 ^d	-6.006 ^d	4.076 ^d	9.147 ^a	

หมายเหตุ: - ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดสอบความคงทนจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการทำผ้ามัดย้อม พบว่า การใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อการซักล้าง น้ำ เหมื่อ และแสงแดดเทียมในระดับดี และมีความคงทนต่อการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้ปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อน้ำ และแสงแดดเทียมในระดับดี ความคงทนต่อการซักล้างและเหมื่อในสภาพกรดและสภาพด่างในระดับปานกลางถึงดี และความคงทนต่อการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้สารช่วยติดสีด้วยเฟอร์สซัลเฟต

ให้ความคงทนต่อการซักล้าง น้ำ เหนือในสภาพกรดและสภาพด่าง แสงแดดเทียมและการขัดถูในระดับ ดีที่สุด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบความคงทนของสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการทำผ้ามัดย้อม

สารช่วยติดสี	การทดสอบความคงทน					ขัดถู
	ซักล้าง	น้ำ	เหงื่อ		แสงแดดเทียม	
			สภาพกรด	สภาพด่าง		
ชุดควบคุม	5	5	5	5	5	5
สารส้ม	4	4	4	4	4	3
น้ำปูนใส	3-4	4	3-4	3-4	4	3
เฟอร์รัสซัลเฟต	5	5	5	5	5	5

หมายเหตุ: - ระดับความคงทน ได้แก่ 5 = ดีที่สุด 4-5 = ดีถึงดีที่สุด 4 = ดี 3-4 = ปานกลางถึงดี 3 = ปานกลาง 2-3 = แย่ถึงปานกลาง 2 = แย่ 1-2 = แย่ถึงแย่มากที่สุด และ 1 = แย่มากที่สุด

3. การทดสอบสีผงโดยการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ

ผลการทดสอบความเข้มสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ พบว่าค่าความเข้มสีจากการย้อมด้วยการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีมีค่าความเข้มสีมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำปูนใส และสารส้ม โดยมีค่าเท่ากับ 7.175 3.074 และ 2.112 ตามลำดับ ซึ่งแต่ละสารช่วยติดสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการวัดค่าสีพบว่าการใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน การใช้น้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลเข้ม และการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตให้โทนสีผ้าเป็นสีเทาเข้ม ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบค่าสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ

สารช่วยติดสี	ค่าสี			ค่าความเข้มสี	ตัวอย่างสีผ้า
	L*	a*	b*		
ชุดควบคุม	92.994 ^a	-0.461 ^c	3.213 ^d	0.137 ^d	
สารส้ม	50.294 ^b	23.441 ^a	23.145 ^a	2.112 ^c	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สารช่วยติดสี	ค่าสี			ค่าความเข้มสี	ตัวอย่างสีผ้า
	L*	a*	b*		
น้ำปูนใส	45.625 ^c	19.841 ^b	19.924 ^b	3.074 ^b	
เฟอร์รัสซัลเฟต	39.773 ^d	-3.415 ^d	7.476 ^c	7.175 ^a	

หมายเหตุ: - ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในระดับเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดสอบความคงทนจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ พบว่าการใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อเหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่าง และต่อแสงแดดเทียมในระดับดี ทนต่อน้ำในระดับปานกลางถึงดี และทนต่อการซักล้างและการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้น้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อเหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่าง และต่อแสงแดดเทียมในระดับดี ทนต่อน้ำในระดับปานกลางถึงดี และทนต่อการซักล้างและการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อการซักล้าง น้ำ เหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่าง แสงแดดเทียม และการขัดถูในระดับดีที่สุด ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดสอบความคงทนของสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการหม่สีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ

สารช่วยติดสี	การทดสอบความคงทน				
	ซักล้าง	น้ำ	เหงื่อ		ขัดถู
			สภาพกรด	สภาพด่าง	
ชุดควบคุม	5	5	5	5	5
สารส้ม	3	3-4	4	4	3
น้ำปูนใส	3	3-4	4	4	3
เฟอร์รัสซัลเฟต	5	5	5	5	5

หมายเหตุ: - ระดับความคงทน ได้แก่ 5 = ดีที่สุด 4-5 = ดีถึงดีที่สุด 4 = ดี 3-4 = ปานกลางถึงดี 3 = ปานกลาง 2-3 = แย่ถึงปานกลาง 2 = แย่ 1-2 = แย่ถึงแย่มากที่สุด และ 1 = แย่มากที่สุด

4. การทดสอบสีผงจากการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า

ผลการทดสอบค่าสีผงจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า พบว่าค่าความเข้มสีจากการย้อมด้วยการใช้เฟอร์สซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีมีค่าความเข้มสีมากที่สุด รองลงมา คือ น้ำปูนใส และสารส้ม โดยมีค่าเท่ากับ 8.172 3.671 และ 2.241 ตามลำดับ ซึ่งแต่ละสารช่วยติดสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการวัดค่าสีพบว่า การใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน การใช้ปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้โทนสีผ้าเป็นสีน้ำตาลเข้ม และการใช้เฟอร์สซัลเฟตให้โทนสีผ้าเป็นสีเทาเข้ม ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การทดสอบค่าสีและความเข้มสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการย้อมเส้นด้ายสำหรับทอผ้า

สารช่วยติดสี	ค่าสี			ค่าความเข้มสี	ตัวอย่างสีผ้า
	L*	a*	b*		
ชุดควบคุม	92.861 ^a	-2.811 ^d	7.674 ^d	0.101 ^d	
สารส้ม	58.683 ^b	18.207 ^b	34.632 ^a	2.241 ^c	
น้ำปูนใส	53.523 ^c	24.555 ^a	29.807 ^b	3.671 ^b	
เฟอร์สซัลเฟต	32.476 ^d	-0.354 ^c	9.781 ^c	8.172 ^a	

หมายเหตุ: - ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดสอบความคงทนจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการหม่สีในการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า พบว่าการใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อน้ำและแสงแดดเทียมในระดับดี ทนต่อการซักล้าง เหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่างในระดับปานกลางถึงดี และทนต่อการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้ปูนใสเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อน้ำและแสงแดดเทียมในระดับดี

ทนต่อการชักล้าง เหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่างในระดับปานกลางถึงดี และทนต่อการชักล้างและการขัดถูในระดับปานกลาง การใช้เฟอร์สซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีให้ความคงทนต่อการชักล้าง น้ำเหงื่อในสภาพกรดและสภาพด่าง แสงแดดเทียมและการขัดถูในระดับดีที่สุด ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความคงทนของสีจากการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า

สารช่วยติดสี	การทดสอบความคงทน					ขัดถู
	ชักล้าง	น้ำ	เหงื่อ		แสงแดดเทียม	
			สภาพกรด	สภาพด่าง		
ชุดควบคุม	5	5	5	5	5	5
สารส้ม	3-4	4	3-4	3-4	4	3
น้ำปูนใส	3	4	3-4	3-4	4	3
เฟอร์สซัลเฟต	5	5	5	5	5	5

หมายเหตุ: - ระดับความคงทน ได้แก่ 5 = ดีที่สุด 4-5 = ดีถึงดีที่สุด 4 = ดี 3-4 = ปานกลางถึงดี 3 = ปานกลาง 2-3 = แย่ถึงปานกลาง 2 = แย่ 1-2 = แย่ถึงแย่มากที่สุด และ 1 = แย่มากที่สุด

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการผลิตสีผงด้วยการตกตะกอนด้วยเกลือพบว่าได้ปริมาณสีผงร้อยละ 26.29 ของน้ำหนักเปลือกฝักโกโก้เริ่มต้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Donkor *et al.* (1991) ที่พบว่าปริมาณเยื่อใยของเปลือกโกโก้เมื่อทำเป็นน้ำหนักแห้งจะเหลือประมาณร้อยละ 26.90 ปริมาณสีผงที่ได้พบว่ามีมากกว่าสีผงที่สกัดจากแก่นฝางที่ได้น้ำหนักสีผงประมาณร้อยละ 13.00 (มาลี และคณะ, 2550) และการผลิตสีผงจากฝักคูณที่ได้น้ำหนักสีผงประมาณร้อยละ 13.50 (นวรรตน์ และคณะ, 2560) ซึ่งจากการได้สีผงปริมาณมากกว่าการใช้พืชชนิดอื่นอาจเป็นเพราะเปลือกฝักโกโก้มีองค์ประกอบพวกเซลลูโลสและเยื่อใยที่มากกว่า (จันทิมา และคณะ, 2565) ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการผลิตสีผงซึ่งเป็นการนำน้ำออกจากวัตถุดิบจึงทำให้มีปริมาณสีผงที่มากกว่า ลักษณะสีของสีผงที่ได้จากเปลือกโกโก้มีสีน้ำตาลเข้ม การที่สีผงให้โทนสีน้ำตาลเป็นเพราะส่วนของเปลือกลำต้น ฝัก หรือผลของพืชส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของรงควัตถุที่เป็นแทนนิน ซึ่งมีบทบาทในการทำให้เกิดสีน้ำตาล และสารแทนนินสามารถกระจายได้ดีในน้ำร้อน (Khanbabaee and van Ree, 2001) ดังนั้นในการสกัดสีครั้งนี้ใช้ความร้อนในการสกัดสีจากเปลือกโกโก้ซึ่งเป็นพืชที่มีแทนนินสูง นอกจากนี้ยังมีสีผงจากพืชธรรมชาติหลายชนิดที่มีแทนนินเป็นองค์ประกอบที่ให้สีน้ำตาล เช่น เปลือกมังคุด (ธนิภา และเพ็ญวิสาข์, 2563; วันแข็ง, 2557) มูลช้าง (ณัฐธิดา และคณะ, 2566) กิ่งมะยมขิด (พัทวัฒน์ และคณะ, 2566) และฝักคูณ (นวรรตน์ และคณะ, 2560) เป็นต้น

ผลการทดสอบค่าสีและความเข้มสีจากการย้อมผ้า โดยใช้สีผงที่ผลิตจากเปลือกฝักโกโก้เมื่อพิจารณาจากค่าความสว่าง (L^*) พบว่าการใช้เฟอร์สซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีให้ค่าความสว่างของสีน้อยที่สุด รองลงมา คือ สารส้ม และน้ำปูนใส ตามลำดับ จากการศึกษาของ Patel and Kanade

(2021) และ Burkinshaw and Kumar (2008) พบว่าเฟอร์รัสซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแทนนินเพื่อเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกแทนเนต (ferric tannate) ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิล (phenolic hydroxyl) ทำให้มีการเปลี่ยนสีของสีธรรมชาติเป็นโทนสีเทาถึงสีดำ การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในการเป็นสารช่วยติดสีและช่วยในการเปลี่ยนสีของการทำผ้าสีธรรมชาติมีการนำมาใช้ในหลายรายงาน เช่น การทำผ้าสีดำพื้นเมือง (ผ่องศรี, 2560) ส่วนการใช้น้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสีจะทำให้สีผ้าที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และการใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีจะให้ความสว่างของสีเพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่าการใช้น้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสี จึงเป็นการใช้สารช่วยติดสีในการไล่เฉดสีในโทนสีน้ำตาลได้ (Failisnur *et al.*, 2018) และเมื่อพิจารณาจากค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ทุกการทดสอบจากการย้อม ได้แก่ การทำผ้ามัดย้อม การท้อมสีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติ และการย้อมเส้นด้ายฝ้ายสำหรับทอผ้า เมื่อใช้สารส้มเป็นสารช่วยติดสีจะให้สีผ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อใช้น้ำปูนใสเป็นสารช่วยติดสีจะให้สีผ้าเป็นสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับหลายรายงานที่พบว่าเมื่อแทนนินทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมอะลูมิเนียม (potassium alum) ซึ่งอยู่ในสารส้มจะให้โทนสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) ซึ่งอยู่ในน้ำปูนใสจะให้โทนสีน้ำตาลเข้ม (Prabhu and Bhute, 2012; Kasembunyakorn *et al.*, 2012) ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีจะให้สีเทาถึงสีดำซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Mongkhlorattanasit *et al.* (2013) ที่พบว่าเมื่อแทนนินทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสซัลเฟตจะให้โทนสีเทาถึงสีดำ ผลการทดสอบความเข้มสีพบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าสี ซึ่งสามารถไล่เฉดสีในการย้อมผ้าด้วยการใช้สารช่วยติดสี ได้แก่ สีดำ สีน้ำตาลเข้ม และสีน้ำตาลอ่อน ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต น้ำปูนใส และสารส้ม ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำสารช่วยติดสีไปใช้ในการประยุกต์ใช้งานในการไล่เฉดสีของการย้อมผ้าในแต่ละประเภทได้ สำหรับความเข้มสีที่ปรากฏลงบนผ้าเมื่อพิจารณาจากค่าสีและค่าความเข้มสี พบว่าในการทดสอบการย้อมผ้าแต่ละวิธีมีผลต่อการติดสีลงบนผ้าด้วย โดยเฉพาะการท้อมสีในการทำผ้าพิมพ์สีธรรมชาติซึ่งจะได้สีที่จางกว่าการย้อมด้วยวิธีอื่น ซึ่งเกิดจากเทคนิคการย้อมที่สีย้อมไม่ได้มีการสัมผัสโดยตรงแต่เป็นการดูดซับของสีผ่านผ้าที่มีการขุบสี ดังนั้นในการใช้สารช่วยติดสีทุกชนิดจึงให้สีที่จางกว่าการย้อมด้วยวิธีอื่น

ผลการทดสอบความคงทนของการย้อมสีด้วยสีผงจากเปลือกฝักโกโก้ด้วยการใช้สารช่วยติดสีพบว่าการใช้สารส้มและน้ำปูนใสให้ความคงทนในระดับปานกลางถึงดี โดยเฉพาะความคงทนต่อการขัดถูจะมีความคงทนในระดับปานกลางเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของผ้าสีธรรมชาติที่มีความคงทนต่อการขัดถูโดยเฉพาะการขัดถูน้อย ซึ่งในการทำความสะอาดต้องใช้ความพิถีพิถันมากกว่าผ้าชนิดอื่น ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตจะให้ความคงทนของสีย้อมมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของณิชา และคณะ (2567) ปรีชา และคณะ (2564) และเกศศิณี และคณะ (2563) ที่กล่าวว่าการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารช่วยติดสีนอกจากจะให้โทนสีเป็นสีเทาถึงดำแล้วยังให้ความคงทนต่อการซักและกิจกรรมอื่นต่อวัสดุที่ใช้ย้อมได้เป็นอย่างดี

ในการศึกษานี้พบว่าการใช้สีผงจากเปลือกฝักโกโก้ในการนำมาย้อมสีผ้าโดยใช้สารส้ม น้ำปูนใส และเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งเป็นสารช่วยติดสีที่นิยมใช้ในการทำผ้าสีธรรมชาติสามารถนำมาใช้ในการย้อมสีผ้าธรรมชาติได้และมีคุณภาพที่สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อยอดได้ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้เป็นการศึกษาคุณภาพของสีผงที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนน้อยในการผลิตสีผงซึ่งเหมาะสมในการนำไปใช้ในกิจกรรมของกิจการธุรกิจโกโก้ แต่อย่างไรก็ตามควรมี

การศึกษาเพิ่มเติมด้านประสิทธิภาพของการย้อมสีเมื่อเก็บรักษาที่ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น หรือ ทดสอบเปรียบเทียบด้วยการผลิตสีผงด้วยวิธีที่สามารถเก็บรักษาสีผงได้ในระยะเวลายาวนานกว่า เช่น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทดสอบคุณภาพผ้าสีธรรมชาติที่ย้อมด้วยสีผงจากเปลือกฝักโกโก้ โดยการใช้ สารช่วยติดสีที่นิยมใช้ในการทำผ้าสีธรรมชาติ พบว่าสามารถผลิตสีผงจากเปลือกฝักโกโก้ได้ร้อยละ 26.29 ของน้ำหนักเปลือกฝักโกโก้เริ่มต้น เมื่อนำไปทดสอบการย้อมพบว่าสีผงที่ได้สามารถนำมาใช้ในการผลิต ผ้าสีธรรมชาติได้ โดยสามารถนำมาย้อมสีโดยการไล่เฉดสีด้วยสารช่วยติดสี และผ้าที่ย้อมมีความคงทน ในระดับปานกลางถึงดีที่สุดในเมื่อใช้สารช่วยติดสีแต่ละชนิดและในการย้อมผ้าแต่ละวิธี โดยหากต้องการ สีผ้าที่เป็นสีโทนน้ำตาลควรใช้สารช่วยติดสีชนิดสารส้มและน้ำปูนใส ส่วนผ้าโทนสีดำควรใช้สาร เพอร์สซัลเฟต และหากต้องการผ้าที่มีความคงทนต่อการติดสีมากที่สุดควรเลือกใช้สารเพอร์สซัลเฟต เป็นสารช่วยติดสี

เอกสารอ้างอิง

- เกศศิณี นามกร พรเพ็ญ อารทกิจวัฒน์ และชนิษฐา วัชรารณณ์. (2563). การศึกษาและพัฒนา กระบวนการย้อมสีกกหอเสื่อด้วยสีธรรมชาติจากครั่ง. ใน *การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58* (หน้า 743-750). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จันทิมา ชั่งสิริพร พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า และนิธนา ชัยฤกษ์. (2565). ผลของการใช้เปลือกโกโก้บดแห้ง เป็นส่วนประกอบในอาหารสำหรับไก่ไข่ต่อผลผลิตและคุณภาพของไข่. *วารสารวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 24(3), 11-19.
- ณัฐธิดา ทิพย์กุล รัตนพล มงคลรัตนาสีธิ์ และสาคร ชลสาคร. (2566). อัตราส่วนที่เหมาะสมของการ พิมพ์สกรีนด้วยสีผงสกัดจากมูลช้าง. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 สมาคม คหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์* (หน้า 98-107). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ณิชา ประสงค์จันทร์ นพดล โพชกำเหนิด และโกสินทร์ ทีปรักษพันธ์. (2567). การพัฒนาสีย้อม ธรรมชาติจากตาลโตนด (*Borassus flabellifer* L.) สู่ผลิตภัณฑ์สิ่งทอชุมชน. *วารสารหน่วย วิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 15(1), 12-24.
- ธนิภา หุตะกมล และเพ็ญวิสาข์ พิสิฐฐศักดิ์. (2563). การย้อมสีผ้าฝ้ายและผ้าเรยอนด้วยสีผงธรรมชาติ ที่สกัดจากเปลือกมังคุด. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58* (หน้า 635-642). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นวรรัตน์ ขาดิวิวัฒน์พรชัย ณัฐนิช ดิษฐภาพร ชนินิษฐา วัชรารณณ์ นิตยา ทับทิมทัย และณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร. (2560). การสกัดสีธรรมชาติจากฝักคูณและประยุกต์ใช้ในการย้อมบนผ้าไหม. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55* (หน้า 833-840). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ปรีชา มุลสิน ทันทิรา พันขารี และกนกกรณ์ ศิริทิพย์. (2564). การศึกษาการย้อมสีธรรมชาติจากใบยางพารา โดยใช้ สารส้ม จุนสี และสนิมเหล็กเป็นสารช่วยติดสี. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(1), 35-40.
- ผ่องศรี รอดโพธิ์ทอง. (2560). พืชพื้นเมืองสำหรับย้อมผ้าสีดำ. *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล.*, 25(2), 163-175.
- พัทวัฒน์ สีขาว พลอยชมพู คำบุญ อริศรา ศรีรักษา และหนึ่งฤทัย เนื้อไม้หอม. (2566). การพัฒนาการเตรียมสีผงจากใบและกิ่งมะยงชิดโดยใช้วิธีการดูดซับด้วยเกลือ. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 5* (หน้า 166-172). เลย: มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.
- ไพรัตน์ ปญญาเจริญนนท์ กาญจนา ลือพงษ์ และจำลอง สาลิกานนท์. (2557). การพัฒนาการเตรียมสีผงจากสีย้อมธรรมชาติ. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- มาลี ตั้งสถิตกุลชัย เสาวณีย์ รัตนพานี วิจิตร รัตนพานี และสายสุนีย์ เหลี้ยวเรืองรัตน์. (2550). การสกัดและการเกิดสารเชิงซ้อนของสีย้อมธรรมชาติจากแก่นฝาง. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ระมัด โชชัย. (2556). การย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติจากใบและเปลือกต้นมะม่วงสำหรับอุตสาหกรรมครอบครัว. *วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่*, 5(4), 116-127.
- วันแข็ง สิทธิกิจโยธิน. (2557). การเตรียมแป้งพิมพ์ด้วยสารชันจากกัมเมลดพืชสำหรับการพิมพ์ผ้าไหมด้วยสีจากเปลือกมังคุด. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ศรินทร์ ทองธรรมชาติ ชื่นจิตร ศรีชูวงศ์ วัชร วารินทร์ และพัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์. (2554). การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสีย้อมกกสังเคราะห์และการผลิตสีย้อมกกจากธรรมชาติ. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, 5(2), 193-203.
- สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร. (2564). *การจัดการความรู้เทคโนโลยีการผลิตโกโก้*. กรุงเทพฯ: การันตี Guarantee (นนทบุรี).
- อรจิรา เจียมสกุล และชุติมา เสพย์ธรรม. (2567). การศึกษาจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการย้อมสีสกัดจากเปลือกหุ้มเมล็ดโกโก้บนผ้าฝ้าย. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 43(2), 26-38.
- Burkinshaw, S.M. and Kumar, N. (2008). A tannic acid/ferrous sulfate after treatment for dyed nylon 6,6. *Dyes and Pigments*, 79(1), 48-53, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2008.01.004>.
- Donkor, A., Atuahene, C.C., Wilson, B.N. and Adomako, D. (1991). Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks. *Animal Feed Science and Technology*, 35(1-2), 161-169, doi: [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(91\)90107-4](https://doi.org/10.1016/0377-8401(91)90107-4).

- Failisnur, F., Sofyan, S., Kasim, A. and Angraini, T. (2018). Study of cotton fabric dyeing process with some mordant methods by using gambier (*Uncaria gambir* Roxb) extract. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 8(4), 1098-1104, doi: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.4.4861>.
- International Standard (ISO 105-B02). (1994). Textiles-tests for colour fastness-part B02: Colour fastness to artificial light: Xenon arc fading lamp test. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Standard (ISO 105-C06). (2010). Textiles-tests for colour fastness-part C06: Colour fastness to domestic and commercial laundering. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Standard (ISO 105-E01). (2010). Textiles-tests for colour fastness-part E01: Colour fastness to water. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Standard (ISO 105-E01). (2010). Textiles-tests for colour fastness-part X12: Colour fastness to rubbing. Geneva: International Organization for Standardization.
- International Standard (ISO 105-E04). (2013). Textiles-tests for colour fastness-part E04: Colour fastness to perspiration. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kasembunyakorn, S., Mouchai, P. and Arirob, W. (2012). Effect of tannin mordant on silk dyed with tropical almond leaves (*Terminalia catappa* Linn.). *Journal of Asian Regional Association for Home Economics*, 19(4), 174-177.
- Khanbabae, K. and van Ree, T. (2001). Tannins: Classification and definition. *Natural Product Reports*, 8(6), 641-649, doi: <https://doi.org/10.1039/b101061l>.
- Kokhanovsky, A.A. (2007). Physical interpretation and accuracy of the Kubelka-Munk theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(7), 2210-2216, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/7/053>.
- Mongkholrattanasit, R., Klaichoi, C., Rungruangkitkrai, N., Punrattanasin, N., Sriharuksa, K. and Nakpathom, M. (2013). Dyeing studies with *eucalyptus*, quercetin, rutin, and tannin: A research on effect of ferrous sulfate mordant. *Journal of Textiles*, 2013, 423842, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/423842>.
- Patel, B. and Kanade, P. (2021). Iron-tannin complex effect on coloration and functional properties of silk fabric. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 22, 100490, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100490>.
- Prabhu, K.H. and Bhute, A.S. (2012). Plant based natural dyes and mordants: A review. *Journal of Natural Product and Plant Resources*, 2(6), 649-664.

การศึกษาระยะของช่องว่างในถังหมักที่ส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารพืช

Study of the Distance of Head Space in Fermented Tank Affect to Plant Nutrients

นันทวัน หัตถมาต^{1*} ลัดดาวลย์ จำปา² และนัฐพงษ์ ทองปาน³
Nanthawan Hadthamard^{1*}, Laddawan Champa² and Natthapong Thongpan³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะของช่องว่างเหนือวัสดุหมักที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณธาตุอาหารหลักของน้ำหมักชีวภาพ วัสดุหมักเศษอาหารปริมาณ 5 ลิตร ถูกหมักในถังพลาสติกขนาดแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดความแตกต่างของระยะช่องว่างในถังหมัก หมักนาน 14 วัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ น้ำหมักจากเศษมะระจีนที่ไม่เหลือช่องว่าง (ชุดควบคุม: HS-C) น้ำหมักจากเศษอาหารที่ไม่เหลือช่องว่าง (HS0) น้ำหมักจากเศษอาหารที่เหลือช่องว่างร้อยละ 25 (HS25) ร้อยละ 50 (HS50) และร้อยละ 75 (HS75) ตามลำดับ เมื่อครบเวลาหมักพบว่าน้ำหมักชีวภาพทุกชุดการทดลองมีสีน้ำตาล มีฟองก๊าซที่ผิวหน้าของน้ำหมักเล็กน้อย มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 6.32-7.59 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 1,412.24-1,772.50 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4.25-5.14 มีจุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิตจำนวน $14.90-20.60 \times 10^6$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร ปริมาณฟอสฟอรัสมีค่าร้อยละ 0.05-0.06 ซึ่งทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันในทางสถิติ น้ำหมักชีวภาพชุดควบคุม (HS-C) มีไนโตรเจนน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.26) แต่มีโพแทสเซียมปานกลาง (ร้อยละ 0.74) น้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหารที่เหลือช่องว่างน้อยกว่าร้อยละ 50 มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 0.30-0.31 0.05-0.06 และ 0.50-0.51 ตามลำดับ ส่วนการหมักเศษอาหารครึ่งถัง (HS50) จะมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากที่สุด คือ ร้อยละ 0.53 0.06 และ 1.12 ตามลำดับ และข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางปรับปรุงคุณภาพดินได้

คำสำคัญ: ช่องว่างในถังหมัก ธาตุอาหารพืช น้ำหมักชีวภาพ เศษอาหาร

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อการจัดการพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีอัตโนมัติและหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

* Corresponding author e-mail: nanthawan.aor04@kru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.263638>

Received: 9 June 2024, Revised: 6 November 2024, Accepted: 25 November 2024

Abstract

The objectives of this research were to study the effect of headspace distance above fermented materials on the quality and main nutrient contents of bio-fermented water. Five liters of food scrap composting materials were fermented in plastic buckets of different sizes, creating variations in headspace distance within fermentation tanks. The experimental design was a completely randomized design (CRD) with five treatments: bitter melon-fermented in a full tank (control: HS-C), and food waste-fermented water in a full tank (HS0), 25% headspace (HS24), 50% headspace (HS50), and 75% headspace (HS75). The results showed that all treatment was brown. Slight gas bubbles were observed on the surface of the bio-fermented water. Electrical conductivity (EC) ranged from 6.32-7.59 S/cm; total dissolved solids (TDS) from 1,412.24-1,772.50 ppm; pH from 4.25-5.14; and total viable counts (TVC) from $14.90-20.60 \times 10^6$ cfu/mL. Phosphorus content ranged from 0.05-0.06%, with no significant differences among treatments ($p < 0.05$). Food waste-fermented water in tanks with less than 50% volume contained the lowest nitrogen (0.30-0.31%), phosphorus (0.05-0.06%), and potassium (0.50-0.51%). HS50 was the best headspace condition, with the highest nitrogen (0.53%), phosphorus (0.06%), and potassium (1.12%). and these data can serve as a guideline for improving soil quality.

Keywords: Head space in fermented tank, Plant nutrient, Bio-fermented water, Food waste

บทนำ

ขยะเศษอาหารเกิดจากอาหารเหลือทิ้งจากการบริโภคและอาหารที่หลุดออกจากห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่ผลผลิตจากขั้นตอนเกษตรกรรม ขนส่ง เก็บรักษา แปรรูป จนถึงการจัดจำหน่าย ทั้งในลักษณะผลผลิตสดและผลิตภัณฑ์อาหาร จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษในปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีขยะอาหารมากถึงร้อยละ 64 ของปริมาณขยะมูลฝอยจำนวน 26.77 ล้านตัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และอาจนำมาสู่มลพิษทางสิ่งแวดล้อม (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน นครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2564)

ปัจจุบันการทำธุรกิจก๋วยเตี๋ยวไก่มะระบุฟเฟต์กำลังเป็นที่นิยม แต่ทุกวันร้านอาหารจะเหลือทิ้งเศษผักมะระจีน เส้นก๋วยเตี๋ยว และเศษกระดูกไก่ จำนวนมาก หากย่อยสลายแล้วจะได้ธาตุอาหารพืชหลายชนิด โดยเฉพาะมะระจีนเป็นผักที่มีสารประกอบฟีนอลหลายชนิด จึงมีการนำมะระจีนมาหมักเป็นสารไล่แมลง อีกทั้งมีโปรตีน วิตามินซี ฟอสฟอรัส และแคลเซียมสูง (เมตไทย, 2563) อย่างไรก็ตามวิธีการย่อยสลายเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับวัสดุหมัก การหมักแบบฝังกลบในสภาวะเปิดตามธรรมชาติเสี่ยงต่อการเกิดกลิ่นเหม็น และเป็นแหล่งพาหะเชื้อโรคปนเปื้อนสู่ดินและแหล่งน้ำ นอกจากนี้ระหว่างหมักจะเกิดก๊าซมีเทนที่สร้างภาวะเรือนกระจก กลายเป็นปัญหา

สิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งการทำน้ำหมักเศษอาหารในถังหมักแบบปิดฝาสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ วิธีนี้ง่าย สามารถทำได้ทุกครัวเรือน และมีสูตรหมักให้เลือกใช้มากมาย หลักการ คือ การนำวัสดุอินทรีย์มาใส่ร่วมกับสารให้ความหวาน ซึ่งในวัสดุอินทรีย์จะมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอยู่แล้วหรือจะเพิ่มจุลินทรีย์ลงไปก็ได้ จุลินทรีย์เหล่านั้นจะใช้สารให้ความหวานเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญเติบโตและการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ ขณะนั้นน้ำหมักจะอยู่ในสภาวะไฮเพอร์โทนิค (hypertonic condition) ที่มีความเข้มข้นสูง น้ำในวัสดุหมักจะแพร่ออกมาพร้อมกับสารอินทรีย์ กระทั่งเซลล์และสลายไปเมื่อเข้าสู่สภาวะพลาสโมไลซิส (plasmolysis) (สมเกียรติ, 2555; Walker, 2018) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุหมัก ระยะเวลาหมัก และชนิดของจุลินทรีย์ เช่น สารระเหยจากอนุพันธ์ของกรดไขมัน กรดแลคติก แอลกอฮอล์ กรดอะมิโน ธาตุอาหารพืช และฮอโมน เป็นต้น (Battista *et al.*, 2022)

งานวิจัยของวัฒนธรงค์ และคณะ (2560) เปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารในน้ำหมักที่หมักในถังหมักนาน 1 เดือน แต่ใช้เศษขยะต่างชนิดกัน ระหว่างเศษอาหาร ไล่ปลา หรือเศษผัก พบว่าน้ำหมักจากไล่ปลาปริมาณฟอสฟอรัสเพียง 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนไนโตรเจนและโพแทสเซียมมีปริมาณใกล้เคียงกับน้ำหมักจากเศษอาหารและเศษผัก คือ 0.20 และ 0.60 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามเศษอาหารเป็นวัสดุหมักที่มีความหลากหลายของวัสดุอินทรีย์ ปริมาณธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพจึงมีความแปรปรวนสูง หากเป็นเศษอาหารประเภทโปรตีนจะมีธาตุไนโตรเจนสูงกว่าเศษพืช และส่วนใหญ่เป็นขยะเปียกที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 78.05 และมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.20 แต่เศษผักจะเต็มไปด้วยน้ำ วิตามินและเกลือแร่ ความเป็นกรด-ด่างจึงค่อนข้างเป็นกลาง มีค่าประมาณ 6.20-6.45 (สุธีรา, 2553; Selvam *et al.*, 2021) ทั้งนี้การทำน้ำหมักชีวภาพนิยมเติมสารเร่งจุลินทรีย์เพื่อให้ย่อยสลายเร็วขึ้น ในสูตรน้ำหมักชีวภาพจากเศษผักและผลไม้ของกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดินกรมพัฒนาที่ดิน (ม.ป.ป.) จะเติมสารเร่ง พด.2 ที่ประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำงานเกื้อกูลกัน เช่น แบคทีเรียผลิตกรดแลคติก แบคทีเรียย่อยสลายโปรตีนและไขมัน แบคทีเรียละลายอินทรีย์ฟอสฟอรัส แอคติโนมัยซิส ยีสต์ และรา

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในน้ำหมักชีวภาพเป็นการทำงานร่วมกันของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจน ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสมแตกต่างกัน หากจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี ย่อมส่งผลต่อคุณภาพของน้ำหมักชีวภาพ (ขวัญตา, 2567) ในงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2023) รายงานว่าการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากผักผลไม้แบบไม่เติมอากาศ จะมีปริมาณออกซิเจนจำกัด จุลินทรีย์ในถังหมักแบบไม่เติมอากาศจึงมีน้อยกว่าถังหมักแบบเติมอากาศ ดังนั้นในการหมักแบบปิด จึงมักติดตั้งระบบเติมอากาศหรือไบโอดักอากาศ เพื่อเติมออกซิเจนเข้าไปในถังระหว่างการหมัก หรือหากเป็นการหมักแบบให้อากาศน้อย (semi-aerobic fermentation) จะอาศัยช่องว่างในถังหมักและการเปิดถังหมักกวนเป็นระยะ เพื่อให้จุลินทรีย์ทุกกลุ่มสามารถเจริญเติบโตได้ วิธีนี้ใช้งบประมาณน้อยกว่าและไม่เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ต่อสภาพแวดล้อม แต่จะใช้เวลาในการแปรรูปสารอินทรีย์ให้กลายเป็นปุ๋ยช้ากว่าแบบเติมอากาศ (ไพฑูรย์, 2562)

จากงานวิจัยของ Laureys *et al.* (2018) รายงานว่า ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมกับปริมาณวัสดุหมัก จะทำให้ได้น้ำหมักชีวภาพที่มีธาตุอาหารและปริมาณจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์สูงกว่าน้ำหมักที่ไม่เติมอากาศ แต่ด้วยข้อจำกัดของการกำจัดขยะครัวเรือนที่ต้องการวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ง่าย สะดวก และค่าใช้จ่ายน้อย การหมักในถังพลาสติกปิดฝาและเปิดฝากวนระหว่างหมัก จึงเป็นวิธีที่นิยมกันมาก อย่างไรก็ตามในแต่ละวันร้านอาหารจะมีปริมาณเศษอาหารไม่เท่ากัน หากเก็บสะสมไว้นานเกินไปเพื่อรอนำเข้ากระบวนการหมัก จะทำให้เศษอาหารเน่าเสียไม่สามารถนำมาหมักได้ ดังนั้นการหมักแต่ละครั้งอาจไม่เท่ากัน และเหลือช่องว่างเหนือวัสดุหมักต่างกันด้วย ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณออกซิเจนในถังหมัก ด้วยเหตุนี้คณะนักวิจัยจึงต้องการศึกษาระยะของช่องว่างเหนือวัสดุหมักที่มีผลต่อปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำหมักชีวภาพ โดยใช้เศษอาหารจากร้านก๋วยเตี๋ยวโก่มะระเป็นกรณีศึกษา และอ้างอิงสูตรการหมักผักของกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน. (ม.ป.ป.) ที่ใช้ระยะเวลาการหมักสั้น ข้อมูลที่ได้รับนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการทำน้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหารในครัวเรือนที่มีค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ต้องติดตั้งระบบเติมอากาศ แต่ใช้วิธีการหมักเศษอาหารให้เหมาะสมกับระยะช่องว่างในถังหมัก นอกจากนี้แล้ว ยังทำให้ทราบระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารเพื่อประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมกับชนิดของพืชได้

วิธีดำเนินการวิจัย

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 5 ชุดการทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ ใช้เศษข้าวสุก เส้นก๋วยเตี๋ยวสุก เศษไก่สุก มะระจีนดิบ และมะระจีนที่เหลือจากในอาหารเป็นวัสดุหมัก รวบรวมจากร้านขายก๋วยเตี๋ยวโก่มะระ เพื่อนำมาหมักในถังหมักขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ ถังพลาสติกที่มีฟาปิดปริมาตร 5.0 6.5 7.5 และ 9.0 ลิตร แต่ละถังคำนวณปริมาตรทั้งหมดจากกันถึงจนถึงขอบบนถัง แล้วแบ่งออกเป็น 4 ระยะ คือ ร้อยละ 25 50 75 และ 100 ของปริมาตรถัง

การหมักใช้สูตรน้ำหมักชีวภาพดัดแปลงจากสูตรน้ำหมักชีวภาพจากผักและผลไม้ของกองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน (ม.ป.ป.) หมักในที่ร่มนาน 14 วัน รายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมชุดการทดลอง

การเตรียมน้ำหมักชีวภาพชุดควบคุม (HS-C) โดยล้างมะระจีนดิบด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง นำผ่านกระชอนให้สะเด็ดน้ำนาน 10 นาที แล้วหั่นให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักให้ได้ 3.5 กิโลกรัม ใส่ลงในถังพลาสติกขนาด 5 ลิตร จากนั้นเติมน้ำตาลปริมาตร 800 มิลลิลิตร สารเร่ง พด.2 น้ำหนัก 2.10 กรัม และน้ำจนครบ 5 ลิตร (เต็มถังหมัก) ใช้ไม้กวนส่วนผสมให้เข้ากันนาน 3 นาที ปิดฝาให้สนิท (ภาพที่ 1)

การเตรียมวัสดุหมักเศษอาหาร โดยนำเศษข้าวสุก เส้นก๋วยเตี๋ยวสุก เศษไก่สุก และเศษมะระจีน (ปนมากับเศษอาหาร) มาล้างด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง นำผ่านกระชอนให้สะเด็ดน้ำนาน 10 นาที แล้วหั่นให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร นำมาผสมรวมกัน และชั่งน้ำหนักรวมให้ได้ 14.0 กิโลกรัม ใส่ลงในถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร จากนั้นเติมน้ำตาลปริมาตร 3.2 ลิตร สารเร่ง พด.2 น้ำหนัก 8.4 กรัม และเติมน้ำจนครบ 20 ลิตร ใช้ไม้กวนส่วนผสมให้เข้ากันนาน 3 นาที และนำไปแบ่ง

บรรจุในถังพลาสติกขนาดประมาณ 5.0 6.5 7.5 และ 9.0 ลิตร ถังละ 5.0 ลิตร ปิดฝาให้สนิท (ภาพที่ 1) จะได้ชุดการทดลองดังนี้

- 1) ชุดการทดลอง HS0 คือ น้ำหมักจากเศษอาหารที่หมักโดยไม่มีช่องว่างในถังหมัก
- 2) ชุดการทดลอง HS25 คือ น้ำหมักจากเศษอาหารที่หมักโดยมีช่องว่างในถังหมักร้อยละ 25 ของถังหมัก
- 3) ชุดการทดลอง HS50 คือ น้ำหมักจากเศษอาหารที่หมักโดยมีช่องว่างในถังหมักร้อยละ 50 ของถังหมัก
- 4) ชุดการทดลอง HS75 คือ และน้ำหมักจากเศษอาหารที่หมักโดยมีช่องว่างในถังหมักร้อยละ 75 ของถังหมัก

ถังหมักทุกชุดการทดลองนำไปหมักในที่ร่ม เปิดฝากลังหมักเพื่อคนทุกวัน ๆ ละ 10 วินาที จนครบ 14 วัน และระวังไม่ให้แมลงวันวางไข่ในถังหมัก



ภาพที่ 1 ลักษณะการหมักเศษวัสดุปริมาณ 5.0 ลิตรต่อถัง ชุดควบคุม HS-C (ก) ชุดการทดลอง HS0 (ข) HS25 (ค) HS50 (ง) และ HS75 (จ)

2. การเก็บข้อมูล

สุ่มเก็บน้ำหมักชีวภาพแต่ละชุดการทดลองมากรองให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ๆ ละ 500 มิลลิลิตร ส่วนหนึ่งส่งไปยังห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 17025 เพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Total Kjeldahl Nitrogen อ้างอิงตามวิธี AOAC 991.20 (AOAC International, 1995a) ส่วนปริมาณฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) ตรวจสอบด้วย ICP-OES อ้างอิงตามวิธี AOAC 975.03 (AOAC International, 1995b) และ AOAC 984.27 (AOAC International, 1995c) ตามลำดับ อีกส่วนนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านเกษตร 3 คน และด้านเทคโนโลยีชีวภาพ 2 คน ทำการประเมินความเข้มข้น ปริมาณฟองก๊าซ และระดับกลิ่นเหม็น (หากไม่มีกลิ่นเหม็น ให้คะแนนเป็น 0) โดยใช้แบบประเมิน 5 ระดับ ตั้งแต่คะแนน 1-5 แสดงระดับจากน้อยไปมาก จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพตามรายการดังนี้ (กฤตเมธ และกรรณิกา, 2566)

1) วัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบพกพา รายงานผลในหน่วยซีเมนตต่อเซนติเมตร (S/cm)

2) วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total dissolved solids: TDS) ด้วยเครื่องวัดค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบพกพา รายงานผลในหน่วย ส่วนในล้านส่วน (ppm)

3) วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (FP20, Mettler Toledo)

4) วัดปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (total viable count: TVC) รายงานผลในหน่วย โคโลนีต่อมิลลิลิตร (cfu/mL)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลจากแบบประเมินมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแปลความหมาย เพื่อวิเคราะห์เชิงเนื้อหา ได้แก่ 1.00-1.80 คือ น้อยที่สุด 1.81-2.60 คือ น้อย 2.61-3.40 คือ ปานกลาง 3.41-4.20 คือ มาก และ 4.21-5.00 คือ มากที่สุด

นำค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณ จุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ทั้งหมด มาวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและหาความแตกต่างทางสถิติระหว่างชุดการทดลอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

หลังจากหมักเศษวัสดุอินทรีย์นาน 14 วัน ได้น้ำหมักชีวภาพสีน้ำตาล พบเส้นใยสีขาวและ ฟองก๊าซขนาดเล็กกระจายอยู่ผิวหน้าของน้ำหมัก กันถึงหมักมีเศษมะระจีนและเศษอาหารที่ยังย่อย ไม่หมดเหลืออยู่ เมื่อประเมินลักษณะภายนอกของน้ำหมักชีวภาพได้ผลดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า น้ำหมักในชุดการทดลอง HS0 HS75 และ HS50 มีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุด ด้วยคะแนนเฉลี่ย 4.40 4.40 และ 4.60 ตามลำดับ ส่วนน้ำหมักในชุดการทดลอง HS-C และ HS25 มีสีน้ำตาลที่ความเข้มระดับมาก ด้วยคะแนนเฉลี่ย 4.20 และ 3.60 ตามลำดับ สำหรับปริมาณฟองก๊าซ และบนผิวหน้าของน้ำหมักชุด การทดลอง HS-C HS50 และ HS75 อยู่ในระดับน้อย มีคะแนนเฉลี่ย 2.60 2.60 และ 2.40 ตามลำดับ ส่วนน้ำหมักชุดการทดลอง HS0 และ HS25 อยู่ในระดับปานกลาง มีคะแนนเฉลี่ย 2.80 และ 2.60 ตามลำดับ เมื่อทดสอบดมกลิ่นแล้วไม่พบกลิ่นเหม็นในน้ำหมักชุดการทดลอง HS50 และ HS75 แต่ น้ำหมักชุดการทดลอง HS-C HS0 และ HS25 มีกลิ่นเหม็นในระดับน้อยที่สุดด้วยคะแนนเฉลี่ย 1.20 1.20 และ 1.00 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะภายนอกของน้ำหมักชีวภาพอายุหมัก 14 วัน

ชุดการทดลอง	สี	ความเข้มสี	ปริมาณฟองก๊าซ	กลิ่นเหม็น
HS-C	น้ำตาล	4.20±0.45	2.60±0.55	1.20±0.45
HS0	น้ำตาล	4.40±0.55	2.80±0.45	1.20±0.45
HS25	น้ำตาล	3.60±0.55	3.00±0.00	1.00±0.00
HS50	น้ำตาล	4.60±0.55	2.60±0.55	0.00±0.00
HS75	น้ำตาล	4.40±0.55	2.40±0.55	0.00±0.00

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

การเปรียบเทียบคุณภาพทางกายภาพและจุลินทรีย์ของน้ำหมักชีวภาพทั้ง 5 ชุดการทดลอง (ตารางที่ 2) พบว่าค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ของน้ำหมักจากเศษอาหาร มีปริมาณมากกว่าน้ำหมักจากเศษมะระจีนในชุดควบคุม ซึ่งน้ำหมักชุดการทดลอง HS50 มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุด รองลงมา คือ HS75 HS25 HS0 และ HS-C เท่ากับ 7.59 7.24 7.17 6.56 และ 6.32 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 2 (ก)) ส่วนปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่มากที่สุดพบในชุดการทดลอง HS50 รองลงมา คือ HS75 HS25 HS0 และ HS-C เท่ากับ 20.60×10^6 19.70×10^6 18.20×10^6 16.40×10^6 และ 14.90×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 2 (ง)) แตกต่างจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่น้ำหมักจากเศษมะระจีน (ชุดควบคุม HS-C) มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ HS50 HS75 HS25 และ HS0 เท่ากับ 1,772.50 1,672.28 1,659.20 1,462.39 และ 1,412.24 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ (ภาพที่ 2 (ข)) สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่าน้ำหมักทั้ง 5 ชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) มีค่าอยู่ในช่วง 4.25-5.14 (ภาพที่ 2 (ค))

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพและปริมาณจุลินทรีย์ของน้ำหมักชีวภาพอายุหมัก 14 วัน

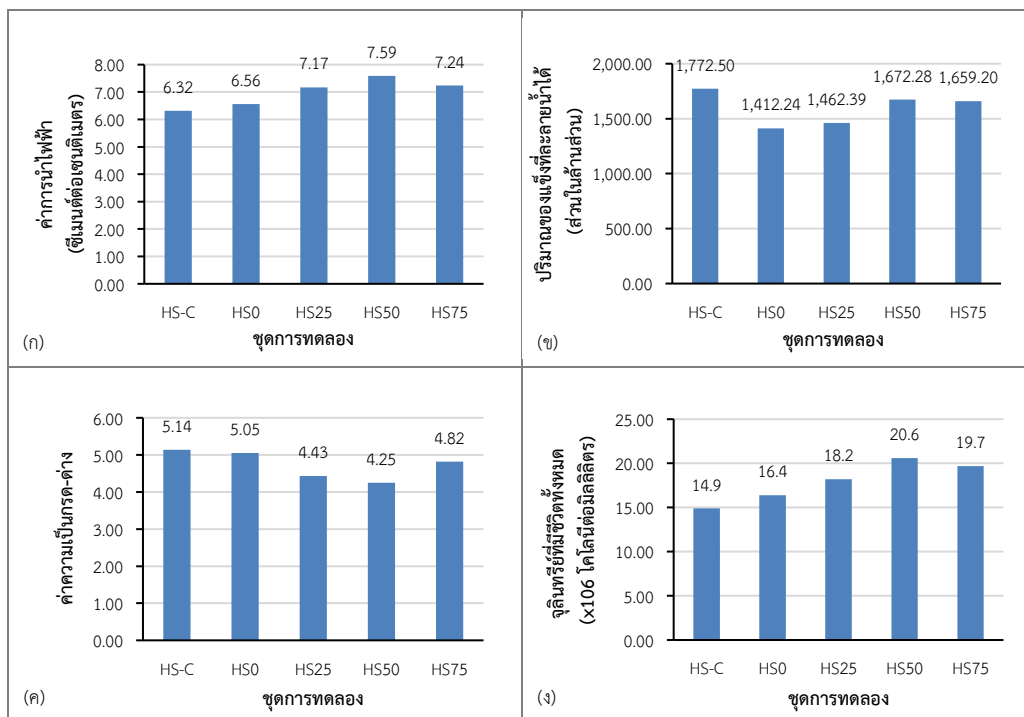
ชุดการทดลอง	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (ส่วนในล้านส่วน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)
HS-C	6.32 ± 1.03^a	$1,772.50 \pm 103.56^{bc}$	5.14 ± 1.23	14.90×10^{6a}
HS0	6.56 ± 1.38^a	$1,412.24 \pm 149.08^a$	5.05 ± 1.07	16.40×10^{6a}
HS25	7.17 ± 0.82^{ab}	$1,462.39 \pm 118.48^a$	4.43 ± 1.18	18.20×10^{6b}
HS50	7.59 ± 0.95^b	$1,672.28 \pm 117.03^b$	4.25 ± 1.73	20.60×10^{6b}
HS75	7.24 ± 1.06^b	$1,659.20 \pm 104.50^{ab}$	4.82 ± 1.39	19.70×10^{6b}

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสมมติเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชที่มีในน้ำหมักชีวภาพทั้ง 5 ชุดการทดลอง (ตารางที่ 3) 3 พบว่าน้ำหมักชีวภาพที่หมักด้วยเศษมะระจีน (ชุดควบคุม HS-C) มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหาร เมื่อเรียงลำดับปริมาณไนโตรเจนที่พบในน้ำหมักแต่ละชนิดพบว่า ชุดการทดลอง HS50 และ HS75 มีไนโตรเจนมากที่สุดและมีปริมาณเท่ากัน คือ ร้อยละ 0.53 รองลงมา คือ HS0 และ HS25 ซึ่งปริมาณไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ ร้อยละ 0.30 และ 0.31 ตามลำดับ และน้ำหมักจากเศษมะระจีนมีไนโตรเจนน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 0.26 (ภาพที่ 3 (ก)) ส่วนปริมาณธาตุฟอสฟอรัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างการหมักด้วยเศษมะระจีนและหมักด้วยเศษอาหาร ซึ่งมีค่าร้อยละ 0.05-0.06 (ภาพที่ 3 (ข)) สำหรับโพแทสเซียมมีปริมาณมากที่สุดในน้ำหมักจากเศษอาหารชุดการทดลอง HS50 รองลงมา คือ HS75 HS-C HS25 และ HS0 ปริมาณร้อยละ 1.12 0.82 0.74 0.51 และ 0.50 ตามลำดับ (ภาพที่ 3 (ค)) ตามค่ามาตรฐาน

ของกรมวิชาการเกษตร (2557) น้ำหมักชีวภาพควรมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ไม่น้อยกว่าอย่างละร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณรวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.50 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าทุกชุดการทดลองมีปริมาณโพแทสเซียมผ่านค่ามาตรฐาน แต่ปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่า ค่ามาตรฐาน ยกเว้นน้ำหมักชีวภาพชุดการทดลอง HS50 และ HS75 ที่มีปริมาณไนโตรเจนและ โพแทสเซียมผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด



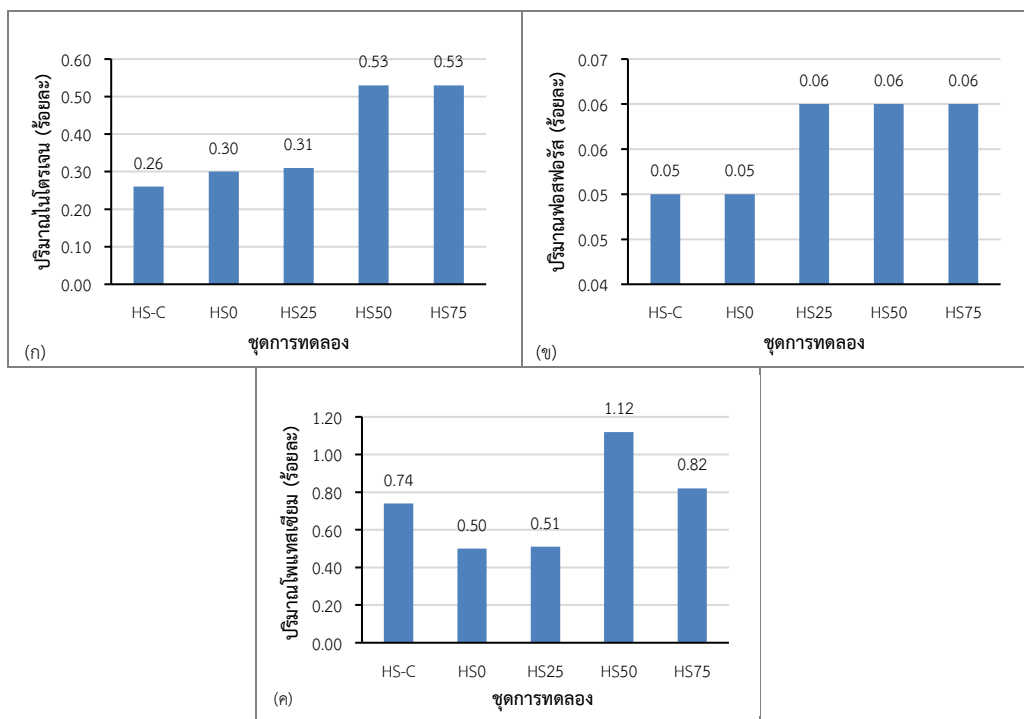
ภาพที่ 2 คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า (ก) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (ข) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค) และปริมาณจุลินทรีย์ของน้ำหมักชีวภาพอายุหมัก 14 วัน

ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชของน้ำหมักชีวภาพอายุหมัก 14 วัน

ชุดการทดลอง	ปริมาณธาตุอาหารหลัก (ร้อยละ)		
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
HS-C	0.26±0.01 ^a	0.05±0.00	0.74±0.01 ^b
HS0	0.30±0.02 ^b	0.05±0.00	0.50±0.01 ^a
HS25	0.31±0.01 ^b	0.06±0.00	0.51±0.01 ^a
HS50	0.53±0.02 ^c	0.06±0.00	1.12±0.01 ^c
HS75	0.53±0.01 ^c	0.06±0.00	0.82±0.01 ^b

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 3 ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (ก) ฟอสฟอรัส (ข) และโพแทสเซียม (ค) ของน้ำหมักชีวภาพอายุหมัก 14 วัน

การอภิปรายผลการวิจัย

เมื่อหมักเศษผักหรือเศษอาหารจนครบ 14 วัน น้ำหมักชีวภาพในชุดควบคุมที่หมักด้วยเศษมะระจีนและน้ำหมักจากเศษอาหารมีสีน้ำตาลเหมือนกัน ซึ่งเป็นสีจากกากน้ำตาล แต่สีของน้ำหมักจากเศษอาหารมีสีเข้มกว่าน้ำหมักจากเศษมะระจีน (ชุดควบคุม HS-C) เนื่องจากในเศษอาหารมีเนื้อไก่ผสมอยู่ สอดคล้องกับงานวิจัยของสุภาพร และศิริศุทธิยากร (2560) พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลา มีสีน้ำตาลเข้มกว่าสีน้ำหมักจากเศษผักและมีไนโตรเจนสูงกว่าด้วย เมื่อนำน้ำหมักจากเศษปลาไปใช้งานร่วมกับปุ๋ยสูตรผสม ผักกาดหอมกรีนโอ๊คเจริญเติบโตดีกว่าการใช้น้ำหมักจากเศษผักเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาความสมบูรณ์ของการหมักจากปริมาณฟองก๊าซและกลิ่นเหม็น พบว่าทุกชุดการทดลองมีฟองก๊าซขนาดเล็กกระจายบนผิวน้ำหมักอยู่ในระดับน้อยจนถึงปานกลาง ด้วยคะแนน 2.40-3.00 น้ำหมักในชุดการทดลอง HS-C HS0 และ HS25 มีกลิ่นเหม็นอยู่ในระดับน้อย ด้วยคะแนน 1.00-1.20 แต่น้ำหมักในชุดการทดลอง HS50 และ HS75 ไม่มีกลิ่นเหม็น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักของน้ำหมักในชุดการทดลอง HS-C HS0 และ HS25 เกิดช้ากว่า เนื่องจากช่องว่างในถังหมักน้อย ออกซิเจนอาจไม่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ขณะที่น้ำหมักชุดการทดลอง HS50 และ HS75 มีช่องว่างในถังหมักเพิ่มขึ้น ออกซิเจนจึงเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตดีกว่า สอดคล้องกับการตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ของน้ำหมักในชุดการทดลอง HS50 และ HS75 มีปริมาณจุลินทรีย์มากถึง 20.60×10^6 และ 19.70×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการหมักแบบเต็มถัง อย่างไรก็ตามการที่น้ำหมักชุดการทดลอง HS75 มีปริมาณจุลินทรีย์น้อยกว่า

จุลินทรีย์ในน้ำหมักชุดการทดลอง HS50 ทั้งที่มีช่องว่างเหนือวัสดุหมักมากกว่า เนื่องจากช่องว่างมากเกินไป ส่งผลให้อุณหภูมิระหว่างการหมักลดลง แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติกในช่วงแรกและเชื้อราที่ชอบอุณหภูมิสูงจึงเจริญเติบโตช้า เป็นผลให้การย่อยสลายเซลลูโลสและการสะสมของกรดอินทรีย์ลดลง (กิตติพงศ์ และคณะ, 2565)

ค่าการนำไฟฟ้าแสดงถึงความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหาร (ตารางที่ 2) พบว่าน้ำหมักในชุดการทดลอง HS-C และ HS0 ที่หมักเต็มถังแต่ใช้วัสดุหมักแตกต่างกัน มีค่าการนำไฟฟ้า (6.32-6.56 ซีเมนตต่อเซนติเมตร) น้อยกว่าการหมักแบบเหลือช่องว่างในถังหมัก (7.17-7.59 ซีเมนตต่อเซนติเมตร) ส่วนค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ของน้ำหมักแสดงถึงปริมาณธาตุอาหารที่ละลายในน้ำ น้ำหมักในชุดการทดลอง HS50 และ HS75 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (1,672.28 และ 1,659.20 ส่วนในล้านส่วนตามลำดับ) มากกว่าน้ำหมักในชุดการทดลอง HS25 และ HS0 แสดงให้เห็นว่าการหมักเศษอาหารที่เหลือช่องว่างในถังหมักตั้งแต่วัยละ 50-75 เป็นสภาวะที่เกิดการย่อยสลายเร็วกว่าชุดการทดลองอื่น สารประกอบทางเคมีในวัสดุหมักจึงแพร่ออกมาได้มาก แม้ยังคงเหลือเศษอาหารขนาดเล็กอยู่ภายในถังหมักก็ตาม เช่นเดียวกับการหมักเปลือกผลไม้กับใบไม้แห้งที่เติมอากาศในอัตรา 0.7 ลิตรต่อนาที่ เมื่อสิ้นสุดการหมักครบ 21 วัน สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายสูงถึงร้อยละ 70 มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและธาตุโพแทสเซียมสูงถึงร้อยละ 9.92 และ 3.20 ตามลำดับ (ตรีรัตน์ และจรีรัตน์, 2559) เพราะปริมาณออกซิเจนในถังหมักที่ระดับดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสังคมจุลินทรีย์ในถังหมัก ทั้งกลุ่มที่ต้องการใช้ออกซิเจน (aerobe microorganism) และกลุ่มที่ไม่ใช้หรือใช้ออกซิเจนน้อย (anaerobe microorganism) เช่น แบคทีเรีย *Bacillus* sp. *Lactobacillus* sp. *Streptococcus* sp. เชื้อรา *Aspergillus niger* *Rhizopus* และ *Penicillium* และยีสต์ *Canida* sp. (Lanthier and Peters, 2013) การที่น้ำหมักจากเศษมะระจีนและจากเศษอาหารทุกชุดการทดลองพบเส้นใยสีขาวกระจายบนผิวน้ำหมัก สอดคล้องกับการพบเส้นใยในน้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหารที่ได้จากสวนอาหารและร้านจำหน่ายสติกจากงานวิจัยของ Nitsuwat *et al.* (2013) แต่จำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตอยู่ในน้ำหมักชุดการทดลอง HS-C HS0 HS25 HS50 และ HS75 มีจำนวน 14.90×10^6 - 20.60×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ซึ่งน้อยกว่าน้ำหมักเศษอาหารของร้านอาหารและร้านจำหน่ายสติกที่มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด 1.22×10^{11} โคโลนีต่อมิลลิลิตร และส่วนใหญ่เป็นยีสต์และแอคติโนมัยซิส เท่ากับ 1.35×10^5 และ 1.27×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบธาตุอาหารหลักของพืชในน้ำหมักชีวภาพจากเศษมะระจีนกับน้ำหมักจากเศษอาหารที่ใช้อัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าการใช้วัสดุหมักต่างชนิดกัน จะมีผลให้ปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมแตกต่างกันด้วย เห็นได้จากน้ำหมักในชุดควบคุม HS-C ที่ใช้มะระจีนเป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว มีไนโตรเจน (ร้อยละ 0.26) น้อยกว่าการหมักด้วยเศษอาหาร (ร้อยละ 0.30-0.53) แตกต่างจากงานวิจัยของวัฒนรงค์ และคณะ (2560) ที่พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษผักและเศษอาหารของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 0.20 0.04 และ 0.60 ตามลำดับ เพราะน้ำหมักจากเศษอาหารในงานวิจัยนี้ใช้เนื้อไก่จากร้านก๋วยเตี๋ยวไก่มะระเป็นส่วนผสม เนื้อไก่ต้มสุกเปื่อยถูกย่อยสลายง่ายกว่าเนื้อสัตว์ และเนื้อสัตว์เต็มไปด้วยโปรตีนที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญ เมื่อมีปริมาณช่องว่างอากาศที่เหมาะสม การย่อยสลายจึงยังทำงานดีขึ้น ทำให้

ปริมาณไนโตรเจนในน้ำหมักชุดการทดลอง HS50 และ HS75 มีมากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ และมากกว่าที่ตรวจพบในงานวิจัยของวัฒนรงค์ และคณะ (2560) อย่างไรก็ตามปริมาณไนโตรเจนในน้ำหมักจากเศษอาหารมากกว่าน้ำหมักจากเศษมะระจีน สอดคล้องกับงานวิจัยของอนุชา และคณะ (2564) ซึ่งทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการหมักเศษผักกะหล่ำปลีกับเครื่องในปลาชนิดจำนวน 3 สูตร พบว่าสูตรที่มีการใช้เครื่องในปลาชนิดปริมาณมาก น้ำหมักชีวภาพจะมีธาตุไนโตรเจนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำหมักจากเศษมะระจีนและเศษอาหารทุกชุด การทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) มีปริมาณร้อยละ 0.05-0.06 ส่วนปริมาณโพแทสเซียมพบว่าน้ำหมักจากเศษมะระจีน (ชุดควบคุม HS-C) มีโพแทสเซียมมากเป็นอันดับ 3 (ร้อยละ 0.74) รองจากชุดการทดลอง HS50 และ HS75 (ร้อยละ 1.12 และ 0.82 ตามลำดับ) เป็นผลจากมะระจีนเป็นผักที่มีโพแทสเซียมสูงประมาณ 314 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย, 2561)

น้ำหมักจากเศษอาหารมีธาตุอาหารพืชมากกว่าน้ำหมักจากเศษมะระจีน โดยเฉพาะปริมาณโพแทสเซียมที่มีมากที่สุด รองลงมา คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ตามลำดับ ซึ่งน้ำหมักในชุดการทดลอง HS50 มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากที่สุด คือ ร้อยละ 0.53 0.06 และ 1.12 ตามลำดับ รองลงมา คือ น้ำหมักในชุดการทดลอง HS75 ที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ HS50 แต่มีปริมาณโพแทสเซียมน้อยกว่า คือ ร้อยละ 0.82 ส่วนน้ำหมักในชุดการทดลอง HS25 และ HS0 มีปริมาณธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เท่ากับ 0.30-0.31 0.05-0.06 และ 0.50-0.51 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณช่องว่างในถังหมักต้องเหมาะสมกับสัดส่วนของวัสดุหมัก (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2565) สอดคล้องกับงานวิจัยของกุลยา และฐนียา (2559) พบว่าการเติมอากาศในกองปุ๋ยหมักเศษอาหาร ใบไม้แห้ง และมูลวัว เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ปุ๋ยหมักจะมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากกว่าปุ๋ยหมักที่ให้อากาศอย่างต่อเนื่องนาน 24 ชั่วโมง และปุ๋ยหมักที่หมักโดยไม่เติมอากาศ เนื่องจากมีปริมาณอากาศเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นตัวกลางสำคัญในการย่อยสลายเศษวัสดุอินทรีย์ พิจารณาได้จากอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะสูงขึ้นขณะย่อยสลาย

สรุปผลการวิจัย

การหมักเศษอาหารที่ใช้เศษข้าวสุก เส้นก๋วยเตี๋ยวสุก เศษไก่สุก และมะระจีน เป็นวัสดุหมักในถังพลาสติกปิดฝาและเปิดฝากวนทุกวัน ๆ ละ 10 วินาที เป็นเวลานาน 14 วัน โดยเว้นช่องว่างเหนือวัสดุหมักไว้ร้อยละ 50 ของถังหมัก (HS50) ซึ่งเป็นขนาดช่องว่างที่เหมาะสมที่สุด น้ำหมักชีวภาพที่ได้มีสีน้ำตาล เหลือฟองก๊าซที่ผิวหน้าของน้ำหมักเล็กน้อย มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.59 ซีเมนตต่อเซนติเมตร ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 1,672.28 ส่วนในล้านส่วน มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.25 และมีจุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิตอยู่จำนวน 20.60×10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร โดยเฉพาะมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากที่สุด คือ ร้อยละ 0.53 0.06 และ 1.12 ตามลำดับ ดังนั้นหากต้องการทำน้ำหมักชีวภาพในถังหมักที่ไม่มีการติดตั้งระบบเติมอากาศ จึงควรเว้นช่องว่างเหนือวัสดุหมักไว้ 1 เท่าของปริมาณวัสดุหมัก เพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอสำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ในถังหมัก

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษ้อัตราการใช้งานน้ำหมักชีวภาพให้เหมาะสมกับพืชแต่ละกลุ่ม ร่วมกับการศึกษาแนวทางการเพิ่มอากาศในถังหมัก เพื่อเพิ่มจำนวนวัสดุหมักแต่ละครั้งให้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัย งบประมาณประจำปีการศึกษา 2567 และขอบคุณร้านอาหารในมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรีที่กรุณารวบรวมและคัดแยกเศษอาหารสำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. (2557). *ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2557*. สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2567, จาก: <https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2019/11/FEDOA11.pdf>.
- กฤตเมธ ตะนัยศรี และกรรณิกา อัมพสุข. (2566). การใช้ประโยชน์จากหญ้าเนเปียร์และเศษผักสดในรูปน้ำหมักชีวภาพ: ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดและค่าความเป็นกรดต่าง. *วารสารเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 2(1), 36-42.
- กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน กรมพัฒนาที่ดิน. (ม.ป.ป.). การผลิตน้ำหมักชีวภาพโดยใช้สารเร่งซูเปอร์ พด.2. สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2567, จาก: <https://www.ddd.go.th/www/files/81827.pdf>.
- กิตติพงศ์ แซ่เตียว ธนิศร มีสังเกต ไพฑูรย์ ทองสุข และชลิตา แก้วบุตรดี. (2565). การพัฒนาวิธีหมักปุ๋ยมูลสุกรแบบเติมอากาศและจุลินทรีย์อัดโนมิติ. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 7(2), 104-112.
- กุลยา สาริชีวิน และฐนียา รังษิสุริยะชัย. (2559). การทำปุ๋ยหมักจากของเสียอินทรีย์โดยใช้ถังเติมอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี*, 14(1), 25-33.
- ขวัญตา พิมพ์พันธ์ นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล และอภิญา สวัสดิ์. (2567). ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะเศษอาหารและเศษใบไม้. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 43(1), 54-65.
- ตรีรัตน์ เจริญกุล และจรัสรัตน์ สกุรัตน์. (2559). ประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็กแบบเติมอากาศ. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, 30(3), 85-93.
- ไพฑูรย์ พชรบำรุง. (2562). *การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบจามจุรีกับเศษผักผลไม้ด้วยระบบภาชนะปิดขนาดเล็ก*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เมดไทย. (2563). *มะระ สรรพคุณและประโยชน์ของมะระจีน 33 ข้อ !*. สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2567, จาก: <https://medthai.com/%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%A3%E0%B8%B0/>.

- วัฒนรงค์ มากพันธ์ เกษมสันต์ คำบุญมา และปิยะ ขวดแก้ว. (2560). ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ จากขยะอินทรีย์ในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 20(2), 19-28.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน นครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2564). *มลพิษจากขยะเศษอาหาร*. สืบค้นเมื่อ 31 พฤษภาคม 2567, จาก: <https://erdi.cmu.ac.th/?p=1155>.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2565). *นวัตกรรมสำหรับกลุ่มวัสดุปรับปรุงดิน ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ และดินพร้อมปลูก: ดินผสมพร้อมปลูกจากผักตบชวา*. สืบค้นเมื่อ 6 มิถุนายน 2567, จาก: <https://www.tistr.or.th/tistrblog/?p=8602>.
- สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ. (2555). น้ำหมักชีวภาพกับการเกษตร. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 3(1), 59-65.
- สำนักโภชนาการ กรมอนามัย. (2561). *มะระจีน*. สืบค้นเมื่อ 6 มิถุนายน 2567, จาก: <https://thaifcd.anamai.moph.go.th/nss/view.php?fid=04186>.
- สุธีรา สุนทรารักษ์. (2553). การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาทฤษฎีการธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม* (หน้า 173-180). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาพร ราช และศิริศานธิญากร จันทร์ขศิริพร. (2560). ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาและผักที่มีต่อการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊กที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(พิเศษ), 216-224.
- อนุชา เพียรชนะ ช่อผกา วงษ์สมบัติ และจิรญา แก้วปัทมฉาย. (2564). การเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพประกอบผลิตจากเครื่องในปลานิลกับเศษผักกะหล่ำปลีในอัตราส่วนที่ต่างกัน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 5(1), 15-24.
- AOAC International. (1995a). Official method 991.20: Nitrogen (total) in milk-Kjeldahl method. In Cuniff, P. (Ed.). *Official methods of analysis of AOAC International*, pp. 7-8. VA: The Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC International. (1995b). *Official method 975.03: Phosphorus, potassium, and calcium in fertilizers-Inductively coupled plasma atomic emission spectrophotometric method*. In Cuniff, P. (Ed.). *Official methods of analysis of AOAC International*, pp. 12-13. VA: The Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC International. (1995c). *Official method 984.27: Minerals in fertilizers-Inductively coupled plasma atomic emission spectrometric method*. In Cuniff, P. (Ed.). *Official methods of analysis of AOAC International*, pp. 20-21. VA: The Association of Official Analytical Chemists.

- Battista, F., Strazzera, G., Valentino, F., Gottardo, M., Vilano, M., Matos, M., Silva, F., Reis, M.A.M., Mata-Alvarez, J., Astals, S., Dosta, J., Jones, R.J., Massanet-Nicolau, J., Guwy, A., Pavan, P., Bolzonella, D. and Majone, M. (2022). New insights in food waste, sewage sludge and green waste anaerobic fermentation for short-chain volatile fatty acid production: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108319, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108319>.
- Lanthier, M. and Peters, S. (2013). Microbial content of activity aerated compost tea after variations of ingredients or procedures. *Acta Horticulturae*, 1009, 219-224, doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1009.26>.
- Laureys, D., Aerts, M., Vandamme, P. and Vuyst, L.D. (2018). Oxygen and diverse nutrients influence the water kefir fermentation process. *Food Microbiology*, 73, 351-361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.02.007>.
- Nitsuwat, S., Sanjaya, S.E., Wiratthikowit, S. and Kunathigan, V. (2013). The study of the biodiversity in local bio-fermented solution and the treatment of community wastewater at laboratory scale: wastewater from restaurants. *The 25th Annual meeting of the Thai society for biotechnology and international conference* (pp. 632-638). Retrieved 6 June 2024, from: <https://shorturl.asia/oVi7m>.
- Selvam, A., Ilamathi, P.M.K., Udayakumar, M., Murugesan, K., Banu, J.R., Khanna, Y. and Wong, J. (2021). Chapter two-food waste properties. In Wong, J., Kaur, G., Taherzadeh, M., Pandey, A. and Lasaridi, K. (Eds.). *Sustainable Food Waste Management: Resource Recovery and Treatment*, pp. 11-41. Amsterdam: Elsevier Inc.
- Walker, G. M. (2018). *Fermentation biotechnology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang, Y., Wang, X., Zhu, W., Zhao, Y., Wang, N., Gao, M. and Wang, Q. (2023). Anaerobic fermentation of organic solid waste: Recent updates in substrates, products, and the process with multiple products co-production. *Environmental Research*, 233, 116444, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116444>.

การเปรียบเทียบความคงตัวของสีเขียวและคุณภาพของลอดช่องสิงคโปร์
ที่ทำจากใบเตย (*Pandan amaryllifolius* Roxb.)
โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำปูนใส
Comparison of Green Color Stability and Qualities of
Singapore Cendol (Lod Chong Singapore) Made from
Pandan Leaves (*Pandan amaryllifolius* Roxb.) Using
Sodium Bicarbonate Solution and Lime Water

สรณีย์ เต็มเปี่ยม¹ วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์¹ ศันสนีย์ ทิมทอง²
และศุภักษร มาแสวง^{1*}

Sansanee Tempiam¹, Woralak Panyathitipong¹, Sansanee Thimthong²
and Supuksorn Masavang^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำปูนใส
อิมัตวในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตยที่มีต่อค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และการทดสอบทางประสาท
สัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ใบเตยที่มีสีเขียวกคงตัวและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดย
สกัดสารสีเขียวจากใบเตยด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ร้อยละ 0.00
0.25 0.50 0.75 และ 1.00) และน้ำปูนใสอิมัตว จากนั้นนำน้ำสกัดที่ได้มาใช้ในการผลิตเส้นลอดช่อง
สิงคโปร์ใบเตย ผลการทดลองพบว่าสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ทำให้
ลอดช่องสิงคโปร์มีสีเขียว ($-a^*$) สูงและคงตัวที่สุด อีกทั้งมีแรงดึง (tensile strength) และค่าความ
ยืดหยุ่น (elasticity) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่น ๆ และใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ใช้ น้ำปูนใส
อิมัตวมากกว่าตัวอย่างสูตรอื่น ($p \leq 0.05$) การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสพบว่าเส้นลอดช่องสิงคโปร์
ใบเตยที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ได้รับการยอมรับสูงสุดในด้าน
ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ดังนั้นการใช้สารละลาย
โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 จึงมีความเหมาะสมในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตย
เพื่อผลิตเส้นลอดช่องสิงคโปร์ใบเตยที่มีสีเขียวกคงตัวและปรับปรุงให้มีคุณภาพทางกายภาพที่ดี

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² สาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* Corresponding author e-mail: supuksorn.m@mutp.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.263713>

Received: 16 June 2024, Revised: 21 November 2024, Accepted: 25 November 2024

คำสำคัญ: ลอดช่องสิงคโปร์ สารสกัดจากใบเตย โซเดียมไบคาร์บอเนต น้ำปูนใสอิมิตัว สารสีเขียว

Abstract

This research investigates the effects of sodium bicarbonate solution and saturated limewater on extracting green pigment from pandan leaves, focusing on color values, texture characteristics, and sensory evaluation of pandan-flavored Singapore cendol (Lod Chong Singapore) to achieve a stable green color and consumer-acceptable quality. The green pigment was extracted from pandan leaves using sodium bicarbonate solution at various concentrations (0.00, 0.25, 0.50, 0.75, and 1.00%) and saturated limewater. The resulting extract was then used in the production of pandan-flavored Singapore cendol noodles. It was found that a 0.25% sodium bicarbonate solution produced Singapore cendol with the highest greenness ($-a^*$), the most stable green color, and superior tensile strength and elasticity compared to other concentrations ($p \leq 0.05$). Additionally, this formulation was more similar in quality to samples made with saturated limewater than to those made with other concentrations. Sensory analysis indicated that the pandan-flavored Singapore cendol noodles made with 0.25% sodium bicarbonate solution received the highest acceptance in terms of appearance, color, aroma, taste, texture and overall preference. Therefore, using a 0.25% sodium bicarbonate solution is suitable for extracting green pigment from pandan leaves to produce pandan-flavored Singapore cendol noodles with a stable green color and enhanced physical quality.

Keywords: Lod Chong Singapore, Pandan leaf extract, Sodium bicarbonate, Saturated limewater, Green pigment

บทนำ

ลอดช่องสิงคโปร์ใบเตยเป็นขนมไทยที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำใบเตยในการผลิตและขึ้นรูปตัดเป็นเส้น เมื่อต้องการบริโภคจึงนำไปต้มให้สุกในน้ำเดือด รับประทานกับกะทิสด น้ำเชื่อมและน้ำแข็งปน (สรราชนีย์ และคณะ, 2566) ซึ่งใบเตย (*Pandan amaryllifolius* Roxb.) มีกลิ่นที่มีความเป็นเอกลักษณ์และปลูกอย่างแพร่หลายในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงในประเทศไทย มักใช้เพื่อให้สีและกลิ่นในอาหาร ขนม และเครื่องดื่มสมุนไพร (Rattanapitigorn *et al.*, 2016) นอกจากคุณค่าทางอาหารแล้ว ใบเตยยังใช้ในอุตสาหกรรมน้ำหอมและยังเป็นยาขับปัสสาวะ บำรุงหัวใจ และป้องกันโรคเบาหวาน (Wakte *et al.*, 2010) สีของอาหารมีความสำคัญต่อการผลิตสัสมอาหารที่มุ่งเพิ่มความน่าดึงดูดใจให้กับผู้บริโภค สามารถผลิตได้จากพืช สัตว์ และสารเคมีสังเคราะห์ โดยทั่วไปสัสมอาหารจากธรรมชาติมีจุดอ่อน คือ สีไม่สม่ำเสมอ มีความคงตัวน้อย และราคาค่อนข้างแพง

ในขณะที่สีผสมอาหารสังเคราะห์มีข้อดี คือ มีความเป็นเนื้อเดียวกันและคงตัวมากกว่า ในการใช้ในอาหาร สีผสมอาหารสังเคราะห์อาจทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพได้หากบริโภคในปริมาณที่มากเกินไป (Arshimny and Syamsu, 2020) โดยทั่วไปการทำขนมไทยที่มีการเติมสีจากธรรมชาติส่วนใหญ่จะไม่มีความเสี่ยง โดยเฉพาะสีเขียวจากใบเตย ซึ่งใบเตยมีรงควัตถุสีเขียวที่สำคัญ คือ คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปอาหารสีเขียวของใบเตยเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่คงตัว ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์เมื่อได้รับความร้อน (Ngo and Zhao, 2007; Zheng *et al.*, 2014; Dewi *et al.*, 2022) หรือการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีความเป็นกรด (Indrasti *et al.*, 2018) สีเขียวของคลอโรฟิลล์เปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำตาลของฟิโอฟิติน (pheophytins) ซึ่งเป็นผลมาจากแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) จะถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในวงแหวนพอร์ไฟริน (porphyrins) เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของฟิโอฟอไรด์ (pheophorbide) และยังสามารถเปลี่ยนเป็นสีเขียวสดของคลอโรฟิลล์ไลด์ (chlorophyllide) โดยอาศัยเอนไซม์คลอโรฟิลเลส (chlorophyllase) ที่เกิดการสูญเสียหมู่ฟิโอฟอไรด์ออกจากโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ (Gunawan and Barringer, 2000; Koca *et al.*, 2006; Senklang and Anprung, 2010) โดยพบว่าสามารถรักษาคลอโรฟิลล์ในระหว่างการแปรรูปได้ เช่น การใช้อุณหภูมิที่สูงเวลาสั้น (high temperature short time: HTST) (Tijksens *et al.*, 2001) การแทนที่แมกนีเซียมไอออนในโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ด้วยไอออนสังกะสีที่มีประจุบวกสอง (Zn^{2+}) (Minh *et al.*, 2019) และการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารเพิ่มความเป็นด่าง (alkalizing agent) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในระหว่างการแปรรูปสูงขึ้น และทำให้คลอโรฟิลล์คงตัวไม่ให้สลายไปหลังการแปรรูป (Koca *et al.*, 2006; Minh *et al.*, 2019; Gandul-Rojas and Gallardo-Guerrero, 2014)

ขนมไทยที่เติมน้ำสกัดใบเตยเพื่อให้กลิ่นหอมและสีเขียวมักใช้น้ำปูนใสเพื่อเพิ่มความคงตัวของสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ เช่น การผลิตลอดช่องสิงคโปร์ที่รายงานโดยสรรพชัย และคณะ (2566) แต่อาหารที่มีแป้งเป็นส่วนผสมหลักหากมีการใช้น้ำปูนใสในขั้นตอนผลิตอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของแป้งได้ ซึ่ง Pedcharat *et al.* (2021) ได้รายงานผลของการแช่แป้งข้าวในน้ำปูนใสทำให้เกิดการสูญเสียการหักเหแสงแบบคู่ (birefringence) ของเม็ดแป้งบางส่วน แป้งมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดลดลงเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ได้แช่น้ำปูนใส ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วง 11-12 โดยน้ำปูนใส การใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตซึ่งเป็นเกลือที่แตกตัวเป็นโซเดียมและไบคาร์บอเนตในน้ำทำให้เกิดสารละลายด่าง (solution alkaline) (de Oliveira, 2020) ที่มีช่วงความเป็นด่างที่ต่ำกว่าและมีคุณสมบัติอาจช่วยปรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ระหว่างการแปรรูปอาหาร และเนื่องจากคลอโรฟิลล์มีความคงตัวในสภาวะต่าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตหรือเบกกิ้งโซดาและน้ำปูนใสอิมมัลชันในการผลิตลอดช่องสิงคโปร์ที่มีสีเขียวจากใบเตยต่อคุณภาพด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ โดยมุ่งหวังให้ผลิตภัณฑ์เส้นลอดช่องสิงคโปร์มีสีเขียวของสารสกัดใบเตยที่คงตัวเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบและสารเคมี

สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate: NaHCO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 0.00 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 (น้ำหนักโดยปริมาตร) ถูกเตรียมโดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือเบกกิ้งโซดา ยี่ห้อ แม็กกาเรต (McGarrett) 0.00 0.50 1.00 1.50 และ 2.00 กรัม ละลายในน้ำสะอาด 200 มิลลิลิตร น้ำปูนใสอิมตัว เตรียมโดยละลายปูนแดง 10.00 กรัม ในน้ำสะอาด 200 มิลลิลิตร คนให้เข้าและตั้งทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ปูนที่ไม่ละลายตกตะกอน แยกเฉพาะน้ำปูนส่วนใสมาใช้ในการทดลองต่อไป ใบเตยสดที่ใช้ในการวิจัยเป็นใบที่ 13 นับจากยอดเป็นต้นไป ซึ่งเป็นใบแก่และมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (chlorophyll a) สูงอยู่ในช่วง 424.18-444.12 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง (Suryani *et al.*, 2020)

2. การสกัดสารสีเขียวจากใบเตย

นำใบเตยสดที่ล้างน้ำให้สะอาดและซับน้ำให้แห้ง หั่นเป็นชิ้นตัดทางขวางของใบเตยยาวประมาณ 1 เซนติเมตร นำไปปั่นผสมกับสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ที่ใช้น้ำสะอาดเป็นตัวทำละลายความเข้มข้นร้อยละ 0.00 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 (น้ำหนักโดยปริมาตร) และน้ำปูนใสอิมตัวเป็นตัวทำละลาย ด้วยอัตราส่วนใบเตยต่อสารสกัดใบเตยเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก ปั่นผสมกันด้วยเครื่องปั่นผสม กำลัง 250 วัตต์ ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นกรองกากใบเตยออกไปด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น และเก็บสารสกัดจากใบเตยในขวดที่บดแสงในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส (สรราชนีย์ และคณะ, 2566) สำหรับใช้ผลิตเส้นลวดช่องสิงคโปร์

3. การเตรียมเส้นลวดช่องสิงคโปร์ใบเตย

การศึกษาผลของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำปูนใสที่ใช้สกัดสารสีเขียวจากใบเตยที่มีผลต่อคุณภาพของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ใบเตย โดยการเตรียมตัวอย่างลวดช่องสิงคโปร์ 6 สูตร ซึ่งดัดแปลงจากวิธีของสรราชนีย์ และคณะ (2566) โดยทำการผสมแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัม และน้ำสกัดจากใบเตย 100 มิลลิลิตร กวนให้แป้งสุกเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเตาไฟฟ้า (ยี่ห้อ Imarflex รุ่น IF-462) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำมานวดผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 150 กรัม ขณะร้อนให้แป้งโดมีเนื้อเนียนเป็นเวลา 5 นาที นำแป้งโดที่ได้มารีดเป็นแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทำเส้นบะหมี่ แล้วตัดให้เป็นขนาด $0.5 \times 18.0 \times 0.4$ เซนติเมตร เส้นลวดช่องสิงคโปร์ใบเตยถูกนำไปต้มในน้ำเดือดด้วยอัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 2 นาที และแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาให้ทำการสะเด็ดน้ำบนตะแกรงสแตนเลสเป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปตรวจสอบคุณภาพ

4. การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำใบเตยและเส้นลวดช่องสิงคโปร์

4.1 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดจากใบเตย

น้ำสกัดจากใบเตยที่สกัดด้วยสารละลายต่าง ๆ ถูกนำมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างที่อุณหภูมิห้อง โดยนำสารสกัดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร วัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter (METTLER TOLEDO รุ่น F20)

4.2 การวัดค่าสีของหลอดช่องสิงคโปร์

การวัดตรวจสอบค่าสี (color values) ของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ที่สุกแล้วด้วยเครื่องวัดสี (Konica Minota รุ่น CR-400) รายงานผลค่าสีด้วยระบบ CIE บันทึกค่า ความสว่าง (L^*) ค่าดัชนีสีแดง (a^*) และ ค่าดัชนีสีเหลือง (b^*) โดยค่าความสว่างมีค่าตั้งแต่ 0 (มืด) ถึง 100 (สว่าง) ค่าดัชนีสีแดงมีค่าบ่งบอกถึงความเป็นสีแดง หากค่าติดลบบ่งบอกถึงความเป็นสีเขียว และค่าดัชนีสีเหลืองมีค่าบ่งบอกถึงความเป็นสีเหลือง หากค่าลบบ่งบอกถึงความเป็นสีน้ำเงิน ทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อวัดสีที่ตำแหน่งบนผิวของตัวอย่างหลอดช่องสิงคโปร์ ทำการรายงานผลค่าเฉลี่ยจากการวัดค่าสีจำนวน 10 ซ้ำ

4.3 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของหลอดช่องสิงคโปร์

วัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และความยืดหยุ่น (elasticity) ของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ขนาด 0.5x18.0x0.4 เซนติเมตร ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer, TA-XT2i, stable micro systems) ที่ติดตั้งหัววัดแรงดึง (tension) รหัส A/SPR ตั้งโปรแกรมในการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเร็วของหัววัดก่อนการทดสอบ (pre-test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วของหัววัดขณะทดสอบ (test speed) 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างแขนทั้งสองข้าง (distance) 100 มิลลิเมตร (ดัดแปลงจากวิธีของ Charutigon *et al.*, 2008) ทำการรายงานผลค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเส้นหลอดช่องสิงคโปร์จำนวน 30 ซ้ำ

4.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) ใช้ผู้ทำการประเมินคุณภาพด้านประสาทสัมผัสหรือผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ซึ่งเป็นนักศึกษาและบุคลากรของคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จำนวน 50 คน นำเสนอตัวอย่างเส้นหลอดช่องสิงคโปร์โดยการนำเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ ปริมาณ 30 กรัม ผสมกับน้ำเชื่อม 20 มิลลิตร และน้ำกะทิ 15 มิลลิตร ใส่ถ้วยพลาสติกติดป้ายรหัสแบบสุ่มด้วยเลข 3 หลัก และต้องกลืนปากด้วยน้ำอุ่นเพื่อกำจัดรสชาติของตัวอย่างก่อนหน้า นำเสนอทีละตัวอย่างตามลำดับ

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัส และวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (randomized completely block design: RCBD) สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์คุณภาพเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT)

ผลการวิจัย

1. ผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดใบเตย และค่าสีของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในการสกัดสีเขียวจากใบเตยสำหรับผลิตเส้นลวดช่องสิงคโปร์

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดใบเตย พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในช่วงร้อยละ 0.00-1.00 ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5.45-8.64 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสารละลายน้ำปูนใสอิมิตัวที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11.73 ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการวิเคราะห์ค่าสีของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ด้วยเครื่องวัดสีเพื่อแยกความต่างของสีผลิตภัณฑ์ให้ชัดเจนขึ้น พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันและน้ำปูนใสอิมิตัวในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตยมีผลต่อค่าสี L^* a^* และ b^* ของเส้นลวดช่องสิงคโปร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.25 มีค่าสีเขียว ($-a^*$) มากที่สุด และลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น อีกทั้งมีสีเขียวมากกว่าตัวอย่างที่ใช้น้ำปูนใสอิมิตัว และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำใบเตยและค่าสี (color values) ของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายแตกต่างกัน

ความเข้มข้นของ สารสกัดใบเตย	ค่าความเป็น กรด-ด่าง ของน้ำใบเตย	ค่าสีของเส้นลวดช่องสิงคโปร์		
		L^*	a^*	b^*
โซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.00 (น้ำเปล่า)	5.45 ± 0.01^f	53.62 ± 0.38^a	-13.74 ± 0.70^e	46.61 ± 0.55^d
โซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.25	8.18 ± 0.01^e	47.08 ± 0.90^c	-23.95 ± 0.70^a	48.97 ± 0.87^a
โซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.50	8.42 ± 0.01^d	46.79 ± 0.84^c	-22.85 ± 0.61^b	48.19 ± 0.70^b
โซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.75	8.55 ± 0.01^c	46.68 ± 0.98^c	-22.79 ± 0.36^b	47.30 ± 0.97^c
โซเดียมไบคาร์บอเนต ร้อยละ 1.00	8.64 ± 0.01^b	46.02 ± 0.83^d	-22.39 ± 0.55^c	47.02 ± 0.82^{cd}
น้ำปูนใสอิมิตัว	11.73 ± 0.01^a	51.02 ± 0.54^b	-18.28 ± 0.36^d	41.28 ± 0.57^e

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ลักษณะปรากฏของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ (ภาพที่ 1) แสดงให้เห็นว่าเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ที่ผลิตด้วยน้ำสกัดใบเตยที่ใช้ด้วยน้ำเปล่าหรือสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.00 มีสีเขียวอ่อนที่สุด และที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 มีสีเขียวสดมากที่สุด และมีสีเขียวของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น แต่ให้สีเขียวสดมากกว่าเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำปูนใสเป็นตัวในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตย



ภาพที่ 1 ลักษณะของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้นแตกต่างกันที่ร้อยละ 0.00 (ก) 0.25 (ข) 0.50 (ค) 0.75 (ง) 1.00 (จ) และน้ำปูนใส (ฉ)

2. ผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์

ผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำปูนใสเป็นตัวมีผลต่อค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.00 มีค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นน้อยที่สุด และเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.25 จากนั้นค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้น้ำปูนใสเป็นตัวส่งผลให้มีค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นสูงที่สุด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นหลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายแตกต่างกัน

ความเข้มข้นของสารละลาย	ลักษณะเนื้อสัมผัส	
	ค่าแรงดึง (กรัม)	ค่าความยืดหยุ่น (มิลลิเมตร)
โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.00 (น้ำเปล่า)	12.83±0.75 ^c	38.57±5.82 ^c
โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.25	13.49±0.91 ^b	43.06±4.74 ^b
โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.50	13.17±0.91 ^{bc}	42.80±6.55 ^b
โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.75	13.15±0.91 ^{bc}	42.12±5.16 ^b
โซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 1.00	13.07±0.86 ^{bc}	41.92±4.95 ^b
น้ำปูนใส	17.77±1.11 ^a	62.33±8.12 ^a

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)
 - ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3. ผลการทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมลอดช่องสิงคโปร์ (ตารางที่ 3) พบว่าเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสหลายด้าน โดยเฉพาะในลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุดในทุกคุณลักษณะที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับการใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นหรือการใช้น้ำปูนใสอิมตัว แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นต่ำของสารละลายช่วยรักษาลักษณะภายนอก ความสดใสของสี และความเป็นธรรมชาติของกลิ่นได้ดีกว่า ในขณะที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้คะแนนคุณภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกลิ่นรสและรสชาติ ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างทุกการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าสารละลายที่ใช้สกัดน้ำใบเตยไม่ได้ส่งผลกระทบต่อรสชาติหลักของเส้นลอดช่อง แต่ผลลัพธ์ด้านอื่น เช่น ลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัส อาจมีบทบาทสำคัญต่อการรับรู้และความพึงพอใจโดยรวมของผู้บริโภค โดยเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

ตารางที่ 3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำใบเตยสกัดด้วยสารละลายในการเตรียมแป้งโดที่แตกต่างกัน

คุณลักษณะ	ความเข้มข้นของสารละลาย			
	สารละลาย	สารละลาย	สารละลาย	น้ำปูนใส อิมตัว
	โซเดียม ไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.25	โซเดียม ไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.50	โซเดียม ไบคาร์บอเนต ร้อยละ 0.75	
ลักษณะปรากฏ	8.25 $\pm$ 0.81 ^a	8.00 $\pm$ 0.99 ^{ab}	7.86 $\pm$ 1.13 ^b	7.92 $\pm$ 1.02 ^b
สี	8.19 $\pm$ 0.75 ^a	7.92 $\pm$ 1.02 ^{ab}	7.83 $\pm$ 0.97 ^b	7.81 $\pm$ 0.92 ^b
กลิ่น	7.89 $\pm$ 0.95 ^a	7.78 $\pm$ 0.93 ^{ab}	7.56 $\pm$ 1.00 ^b	7.61 $\pm$ 0.99 ^{ab}
กลิ่นรส	7.83 $\pm$ 0.91 ^{ns}	7.72 $\pm$ 0.97 ^{ns}	7.58 $\pm$ 0.94 ^{ns}	7.69 $\pm$ 1.04 ^{ns}
รสชาติ	7.86 $\pm$ 0.76 ^{ns}	7.78 $\pm$ 0.90 ^{ns}	7.61 $\pm$ 1.10 ^{ns}	7.72 $\pm$ 1.14 ^{ns}
เนื้อสัมผัส	8.11 $\pm$ 0.85 ^a	7.81 $\pm$ 1.06 ^{ab}	7.72 $\pm$ 1.11 ^b	7.69 $\pm$ 1.06 ^b
ความชอบโดยรวม	7.94 $\pm$ 0.92 ^a	7.69 $\pm$ 1.09 ^{ab}	7.53 $\pm$ 1.16 ^b	7.78 $\pm$ 1.05 ^{ab}

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

การอภิปรายผลการวิจัย

1. ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดใบเตย และค่าสีของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายต่าง ๆ ในการสกัดสีเขียวจากใบเตยสำหรับผลิตเส้นลวดช่องสิงคโปร์

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดใบเตย พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตที่ใช้สกัดน้ำใบเตย ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นแต่มีค่าต่ำกว่าสารละลายน้ำปูนใสอิมิตัว (ตารางที่ 1) โซเดียมโบคาร์บอเนตเป็นเกลือของกรดอ่อนที่ประกอบด้วยอะตอมของโซเดียม ไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน และมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 8.3 เมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่า 0.01 โมลาร์ ทำให้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตมักถูกใช้เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ในงานด้านชีวเคมี (Aziz *et al.*, 2023) นอกจากนี้งานวิจัยของ Pedcharat *et al.* (2021) ได้รายงานค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำปูนใสอิมิตัวที่ใช้ในการหมักแป้งข้าวเจ้ามีค่าเท่ากับ 12.38 ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในการทดลองนี้

ลักษณะปรากฏของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ในภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ผลิตด้วยน้ำสกัดใบเตยที่ใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้สีเขียวของผลิตภัณฑ์ลดลง และยังทำให้เส้นลวดช่องสิงคโปร์มีสีเขียวสดมากกว่าตัวอย่างที่ใช้น้ำเปล่าและน้ำปูนใสอิมิตัวในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตย ซึ่งมีแนวโน้มในทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสีที่พบว่าเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.25 มีค่าสีเขียว ($-a^*$) มากที่สุด และลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของโซเดียมโบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น อีกทั้งมีสีเขียวมากกว่าตัวอย่างที่ใช้น้ำปูนใสอิมิตัว และตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนต (ตารางที่ 1) การใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตร้อยละ 0.00 หรือน้ำเปล่า ในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตย สารสกัดสีเขียวที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.45 ซึ่งในสภาพความเป็นกรดสามารถทำให้ความคงตัวของคลอโรฟิลล์ลดลง จึงทำให้ได้สารละลายที่มีสีเขียว ($-a^*$) ต่ำที่สุดในขณะที่ลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตและน้ำปูนใสที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า และมีค่าสีเขียว ($-a^*$) ตีลบมากกว่าทำให้ยังคงมีสีเขียวเข้ม ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของสีเขียวเนื่องจากการทำการเปลี่ยนรงควัตถุสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ของใบเตยให้เป็นเป็นสารประกอบฟิโอฟิติน (pheophytin) โดยการแทนที่แมกนีเซียมในโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของกรด ซึ่งมีสีเขียวอมน้ำตาล ซึ่งหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงจะมีการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออนมากตามไปด้วยส่งผลให้มีโอกาสเกิดแทนที่ได้มากขึ้น (Gunawan and Barringer, 2000) จึงเป็นผลทำให้เส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.00 ในการสกัดสารสีเขียวจากใบเตยมีสีเขียวน้อยที่สุดดังปรากฏในภาพที่ 1 และมีค่าความสว่าง (L^*) มากที่สุด (ตารางที่ 1) ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gunawan and Barringer (2000) ที่ศึกษาผลของการสลายตัวของสารสีเขียวในผักบล็อกโคลีลวกในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3-8

นอกจากนี้อัตราการสูญเสียสีเขียวและการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ของถั่วลันเตาลดลงเมื่อ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ปลูกเพิ่มขึ้น ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.5-7.5 (Koca *et al.*, 2006) การใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีระดับความเข้มข้นสูงขึ้นและน้ำปุ๋นใส้อมตัวมีผล ทำให้สารสกัดจากใบเตยมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงของความเป็นด่าง การสกัดสารสีเขียวจาก ใบเตยในสภาวะที่มีความเป็นด่างสามารถช่วยเพิ่มความคงตัวของรงควัตถุที่ให้สีเขียวได้ จากการศึกษา ของ Kaewsuksaeng (2011) รายงานว่าในสภาวะที่เป็นด่างทำให้เอนไซม์คลอโรฟิลเลสสามารถเปลี่ยน คลอโรฟิลล์ให้เป็นคลอโรฟิลล์ที่มีสีเขียวสด สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น และมีความคงตัวมากกว่า คลอโรฟิลล์ แต่เอนไซม์คลอโรฟิลเลสมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมที่ 7.6-8.0 (Sytykiewicz *et al.*, 2013) จึงมีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์คลอโรฟิลเลสลดลงเมื่อมีค่า ความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 8.0 จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไบคาร์บอเนตมีผลทำให้เส้นลวดช่องสังเคราะห์มีสีเขียว ค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองลดลง อาจเนื่องมาจาก ในการผลิตเส้นลวดช่องสังเคราะห์จากเจล มีการให้ความร้อนกับสารสกัดสีเขียวที่มีความเป็นด่างจาก โซเดียมไบคาร์บอเนต เกิดการสลายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ โซเดียมคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัดจากใบเตยสูงกว่า 8.0 จึงมีผลทำให้ กิจกรรมของเอนไซม์คลอโรฟิลเลสลดลง

นอกจากนี้มีการรายงานถึงค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 13 สามารถทำลายโครงสร้าง ผลึกและบริเวณอสัณฐาน (amorphous region) และกระตุ้นการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งที่ อุณหภูมิห้องได้ อย่างไรก็ตามสารละลายต่างที่ความเข้มข้นต่ำ เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 12.40 ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกแต่สามารถ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างอสัณฐานได้ (Karim *et al.*, 2008; Rafiq *et al.*, 2016) โดยมีผลต่อคุณสมบัติ การพองตัวและความหนืดของแป้ง จากการศึกษาของ Xu *et al.* (2024) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติของแป้งในสารละลายต่างที่ไม่รุนแรงในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.5-11.3 แสดง ให้เห็นว่าสภาวะต่างที่ไม่รุนแรงสามารถกระตุ้นการแตกตัวของหมู่ไฮดรอกซิลในบริเวณอสัณฐาน ซึ่ง ทำให้เม็ดแป้งขยายตัวและเพิ่มความยืดหยุ่นของโมเลกุลแป้งโดยการผลักรันของประจุลบในสายโพลีเมอร์ ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเม็ดแป้งในเส้นลวดช่องสังเคราะห์ที่ใช้สารละลาย โซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าสารละลายอื่น (ตารางที่ 1) มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและพองตัวได้น้อย ส่งผลให้โมเลกุลน้ำและความร้อนแทรกตัว เข้ามาได้น้อย อาจทำให้สารสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ถูกทำลายด้วยความร้อนน้อยกว่าสภาวะอื่น ด้วย เหตุนี้จึงมีค่าสีเขียว ค่าความสว่าง และค่าสีเหลืองมากที่สุด ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงขึ้นจาก การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตจะส่งผลให้เส้นลวดช่องสังเคราะห์มีค่าสีเขียว และสีเหลืองที่ลดลง แต่ยังคงมีค่าสีเขียวและสีเหลืองมากกว่าการใช้น้ำปุ๋นใส้อมตัวในการสกัดสีเขียว จากใบเตย (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 11.73)

2. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นลวดช่องสังเคราะห์

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ร้อยละ 0.25 ที่ใช้ในการ เตรียมน้ำใบเตยสำหรับการนวดแป้งโด ส่งผลให้เส้นลวดช่องสังเคราะห์มีค่าแรงดึงและความยืดหยุ่น สูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นที่ร้อยละ 0.50-1.00 มีผลทำให้ค่าแรงดึง

และค่าความยืดหยุ่นลดลง ในขณะที่เมื่อใช้น้ำปูนใสอิมตัวส่งผลให้มีค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นสูงสุด (ตารางที่ 2) ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเป็นต่างของสารสกัดใบเตย เนื่องจากต่างทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวมากขึ้นก่อนที่จะแตกออก (Pedcharat *et al.*, 2021; Lai *et al.*, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Han *et al.* (2012) ได้รายงานเกี่ยวกับการพองตัวของแป้งบัควีท (buckwheat flour) โดยสังเกตจากค่าแรงดึงของเส้นบะหมี่ที่สุกแล้วที่มีการเติมความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน (ร้อยละ 0.00-1.00) พบว่าค่าแรงดึงเพิ่มจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 6.63 (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.00) และมีค่าแรงดึงสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12.31 (แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.40) หลังจากนั้นค่าแรงดึงจะลดลง ซึ่งค่าแรงดึงมีความสัมพันธ์กับความหนืดที่สามารถใช้ประเมินคุณสมบัติของเนื้อสัมผัสทางอ้อมได้ โดยค่าความหนืดที่มากขึ้น บ่งชี้ว่าเม็ดแป้งมีการบวมตัวก่อนที่จะแตกออกมากกว่าค่าที่มีความหนืดน้อยกว่า โดยไอออนของโลหะอัลคาไล/อัลคาไลเอิร์ธ (alkali/alkali earth metal ions) และหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของแป้งมีปฏิสัมพันธ์กันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผลึกมีแนวโน้มที่จะถูกทำลายโดยการแทนที่โปรตอนด้วยไอออนบวก ซึ่งช่วยเร่งการปล่อยอะมิโนสออกมาจากเม็ดแป้งและหมู่ไฮดรอกซิลจากสายพอลิเมอร์ของแป้ง อาจทำให้เกิดการแทนที่ของโปรตอนด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไอออนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกตัว ($\text{Ca}(\text{OH})^+$) โดยเกิดพันธะระหว่างแคลเซียมไอออนกับแป้ง และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวกับแป้ง ซึ่งจะทำให้เม็ดแป้งขยายตัวและพองตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของสารไอออนิกสูง (Lai *et al.*, 2004) จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัดจากใบเตยด้วยน้ำเปล่ามีค่าความเป็นกรด (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.45) จึงทำให้เส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.00 มีค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นน้อยที่สุด สำหรับการใช้ปูนใสอิมตัวทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัดจากใบเตยมีค่าความเป็นต่าง (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 11.73) สูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25-1.00 (ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.18-8.64) และแคลเซียมไอออนจากน้ำปูนใสมีความเป็นไอออนิกสูงกว่าโซเดียมไอออน (Na^+) จึงสามารถเกิดพันธะกับแป้งได้แข็งแรงกว่า ทำให้เส้นลอดช่องสิงคโปร์สุกมีความหนืดสูง ส่งผลให้เส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำปูนใสอิมตัวมีค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นสูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

การใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตสกัดสีเขียวจากใบเตยในการผลิตเส้นลอดช่องสิงคโปร์ พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น จากร้อยละ 0.25-1.00 ค่าแรงดึงและค่าความยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อย ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อาจเกี่ยวข้องกับการบวมตัวของเม็ดแป้งก่อนที่จะแตกออก (Lai *et al.*, 2004) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้งได้น้อยลง อาจส่งผลให้เม็ดแป้งดูน้ำได้ลดลงและพองตัวได้เล็กน้อยขณะที่ให้ความร้อนแก่แป้ง ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันจึงถูกจำกัด ทำให้ความหนืดลดลงเพียงเล็กน้อย จนไม่สามารถสังเกตการเกิดเจลลิตินในเซชันได้ชัดเจนเมื่อใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือโซเดียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่างกัน และรวมถึงสารละลายอิมตัว (Ragheb *et al.*, 1995)

3. การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมลอดช่องสิงคโปร์ในการวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำปูนใสอิมตัวเป็นตัวอย่างควบคุม เนื่องจากเป็นสารละลายที่ใช้กันทั่วไปในการผลิตขนมไทยในปัจจุบัน ส่วนตัวอย่างลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 0.00 จากลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 1 จะเห็นว่าตัวอย่างมีสีเขียวซีดจางกว่าตัวอย่างอื่นและมีค่าลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างจากตัวอย่างที่ใช้น้ำปูนใสมากที่สุด ($p \leq 0.05$) ดังนั้นตัวอย่างนี้จึงไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นในการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของขนมลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 สูงกว่าตัวอย่างอื่น ซึ่งเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่ม และมีสีเขียวเข้มที่สุด การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ร้อยละ 0.50 และ 0.75 มีผลทำให้แบ่งเกิดเจลมากขึ้น เนื้อสัมผัสของลอดช่องสิงคโปร์มีความเหนียวลดลง สำหรับเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำปูนใสอิมตัวจะมีสีเขียวน้อยกว่าและมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียวกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต เนื่องจากความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของสารไอออนิกสูง (Lai et al., 2004) ซึ่งโซเดียมไอออนจากสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารประกอบไอออนิกของโลหะอัลคาไลที่มีความเป็นไอออนิกน้อยกว่าแคลเซียมไอออนจากน้ำปูนใสอิมตัวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารประกอบไอออนิกของโลหะอัลคาไลเอิร์ธ จึงทำให้เส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้น้ำปูนใสอิมตัวมีความเหนียวและความแข็งแรงกว่าสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และความเหนียวลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต จึงส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม สำหรับด้านกลิ่นรสและรสชาติผู้ทดสอบชิมไม่สามารถแยกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างขนมลอดช่องสิงคโปร์เพื่อทดสอบชิมมีการเติมน้ำเชื่อมและกะทิด้วยปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลให้ผู้ทดสอบชิมไม่สามารถแยกกลิ่นรสและรสชาติได้ โดยขนมลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ในการสกัดสีเขียวจากใบเตยได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมสูงสุดในทุกด้าน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีด้วยเครื่องวัดสี และด้านลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส

สรุปผลการวิจัย

สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้สกัดสีเขียวจากใบเตยในการผลิตเส้นลอดช่องสิงคโปร์มีผลต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส รวมถึงคุณภาพด้านประสาทสัมผัส ซึ่งเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเขียว ค่าแรงดึง และค่าความยืดหยุ่นมากที่สุด เมื่อเทียบกับลอดช่องสิงคโปร์ที่ใช้สารสกัดสีเขียวจากใบเตยที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ อีกทั้งยังได้รับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงกว่า

ลดช่องว่างสีที่ใส่สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นสูงกว่าและน้ำปูนใสในการสกัดสีเขียวจากใบเตย แสดงให้เห็นว่าสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตมีศักยภาพในการนำมาใช้ในการเพิ่มความคงตัวของสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ที่สกัดจากใบเตยและปรับปรุงคุณภาพด้านสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และลักษณะทางประสาทสัมผัสแทนการใช้น้ำปูนใสอมตัวได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่อนุเคราะห์สถานที่ ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- สรระนีย์ เต็มเปี่ยม วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์ และศุภักษร มาแสวง. (2566). ผลของแป้งสุกในแป้งโดที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส สี และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลดช่องว่างสีจากใบเตย. *PBRU Science Journal*, 20(1), 19-23.
- Arshimny, N.A. and Syamsu, K. (2020). Production and characteristic of natural coloring and flavoring preparations from pandan leaves (*Pandanus amaryllifolius*). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (pp. 012014). Bogor: IOP Publishing.
- Aziz, A., Rubinoff, J., Kaur, M. and Cohen, J. (2023). The effect of the sodium bicarbonate buffer on the acidity of hydroponically grown kale. *Journal of Dawning Research*, 5, 3-20.
- Charutigon, C., Jitpupakdree, J., Namsree, P. and Rungsardthong, V. (2008). Effects of processing conditions and the use of modified starch and monoglyceride on some properties of extruded rice vermicelli. *LWT-Food Science and Technology*, 41(4), 642-651, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.04.009>.
- de Oliveira, A.F. (2020). Buffering function: A general approach for buffer behavior. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 6(3), 0387-0396, doi: <https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss3pp0387-0396>.
- Dewi, E.N., Purnamayati, L. and Jaswir, I. (2022). Effects of thermal treatments on the characterisation of microencapsulated chlorophyll extract of *Caulerpa racemose*. *International Food Research Journal*, 29(6), 1279-1292.
- Gandul-Rojas, B. and Gallardo-Guerrero, L. (2014). Pigment changes during processing of green table olive specialties treated with alkali and without fermentation. *Food Research International*, 65(Part B), 224-230, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.007>.

- Gunawan, M.I. and Barringer, S.A. (2000). Green color degradation of blanched broccoli (*Brassica oleracea*) due to acid and microbial growth. *Journal of Food Processing and Preservation*, 24, 253-263, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2000.tb00417.x>.
- Han, L., Lu, Z., Hao, X., Cheng, Y. and Li, L. (2012). Impact of calcium hydroxide on the textural properties of buckwheat noodles. *Journal of Texture Studies*, 43(3), 1-8, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2011.00331.x>.
- Indrasti, D., Andarwulan, N., Purnomo, E.H. and Wulandari, N. (2018). Stability of chlorophyll as natural colorant: A review for Suji (*Dracaena angustifolia* Roxb.) leaves' case. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 6(3), 609-625, doi: <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.3.04>.
- Kaewsuksaeng, S. (2011). Chlorophyll degradation in horticultural crops. *Walailak Journal of Science and Technology*, 8(1), 9-19.
- Karim, A.A., Nadiha, M.Z., Chen, F.K., Phuah, Y.P., Chui, Y.M., and Fazilah, A. (2008). Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch. *Food Hydrocolloids*, 22(6), 1044-1053, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.05.011>.
- Koca, N., Karadeniz, F. and Burdurlu, H.S. (2006). Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas. *Food Chemistry*, 100(2), 609-615, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.079>.
- Lai, L.N., Karim, A.A., Norziah, M.H. and Seow, C.C. (2004). Effects of Na₂CO₃ and NaOH on pasting properties of selected native cereal starches. *Journal of Food Science*, 69(4), 249-256, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb06324.x>.
- Minh, N.P., Vo, T.T., Van Man, L., Phong, T.D., Van Toan, N. and Vo, H.N. (2019). Green pigment extraction from pandan (*Pandanus amaryllifolius*) and its application in food industry. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 11(3), 925-929.
- Ngo, T. and Zhao, Y. (2007). Formation of zinc-chlorophyll-derivative complexes in thermally processed green pears (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Science*, 72(7), C397-C404, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00465.x>.
- Pedcharat, K., Jangchud, K. and Prinyawiwatkul, W. (2021). Physicochemical properties of rice flour as affected by alkaline soaking and washing treatments. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(5), 2539-2547, doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14892>.
- Rafiq, S.I., Singh, S., and Saxena, D.C. (2016). Effect of alkali-treatment on physicochemical, pasting, thermal, morphological and structural properties of Horse Chestnut (*Aesculus indica*) starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10, 676-684, doi: <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9351-y>.

- Ragheb, A.A., Abdel-Thalouth, I. and Tawfik, S. (1995). Gelatinization of starch in aqueous alkaline solutions. *Starch/Stärke*, 47(9), 338-345, doi: <https://doi.org/10.1002/star.19950470904>.
- Rattanapitigorn, P., Ogawa, M. and Rattanapanone, N. (2016). Effect of Methocel™, maltodextrin, sodium chloride, and pH on foaming properties and foam-mat drying of aqueous pandan (*Pandanus amaryllifolius*) leaves extract. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 15(3), 237-252.
- Senklang, P. and Anprung, P. (2010). Optimizing enzymatic extraction of Zn-chlorophyll derivatives from pandan leaf using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(1), 759-776, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00393.x>.
- Suryani, C.L.S., Wahyuningsih, T.D., Supriyadi, S. and Santoso, U. (2020). The potential of mature pandan leaves as a source of chlorophyll for natural food colorants. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 31(2), 127-137, doi: <https://doi.org/10.6066/jtip.2020.31.2.127>.
- Sytykiewicz, H., Sprawka, I., Czerniewicz, P., Sempruch, C., Leszczynski, B. and Sikora, M. (2013). Biochemical characterization of chlorophyllase from leaves of selected *Prunus* species-A comparative study. *Acta Biochimica Polonica*, 60(3), 457-465, doi: https://doi.org/10.18388/abp.2013_2007.
- Tijksens, L.M.M., Schijvens, E.P.H.M. and Biekman, E.S.A. (2001). Modelling the change in colour of broccoli and green beans during blanching. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(4), 303-313, doi: [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(01\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(01)00045-5).
- Wakte, K.V., Thengane, R.J., Jawali, N. and Nadaf, A.B. (2010). Optimization of HS-SPME conditions for quantification of 2-acetyl-1-pyrroline and study of other volatiles in *Pandanus amaryllifolius* Roxb. *Food chemistry*, 121(2), 595-600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.056>.
- Xu, Z., Liu, X., Zhang, C., Ma, M., Sui, Z. and Corke, H. (2024). Effect of mild alkali treatment on the structure and physicochemical properties of normal and waxy rice starches. *Foods*, 13(15), 2-11, doi: <https://doi.org/10.3390/foods13152449>.
- Zheng, Y., Shi, J., Pan, Z., Cheng, Y., Zhang, Y. and Li, N. (2014). Effect of heat treatment, pH, sugar concentration, and metal ion addition on green color retention in homogenized puree of Thompson seedless grape. *LWT - Food Science and Technology*, 55(2), 595-603, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.011>.

การขยายพันธุ์กล้วยนา (Musa acuminata cv Red Dacca)
 ในหลอดทดลอง
In Vitro Propagation of Banana NAK
 (Musa acuminata cv Red Dacca)

ราตรี นิตยเดชพัฒน์^{1*} และพรศรี ชื่นชม¹
 Ratree Nitayadejpat^{1*} and Pornsri Chunchom¹

บทคัดย่อ

กล้วยนา (Musa acuminata cv Red Dacca) เป็นกล้วยที่พบได้ยากและมีคุณค่าทางอาหารสูง การขยายพันธุ์กล้วยโดยทั่วไปนิยมใช้หน่อ ซึ่งมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการปลูกในเชิงพาณิชย์ การศึกษานี้มุ่งเน้นการขยายพันธุ์กล้วยนาในหลอดทดลอง โดยนำส่วนลำต้นใต้ดินของกล้วยนามาตัดแต่งและฟอกฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนออกซ์ความเข้มข้น 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 35 และ 15 นาที ตามลำดับ ก่อนนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร Murashige and Skoog (MS) ที่เติมเบนซิลอะดีนีน (benzyladenine: BA) ความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่เติมหรือไม่เติมน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิตร เพื่อชักนำการสร้างหน่อ หลังเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าอาหารสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิตร ชักนำการสร้างหน่อเฉลี่ย 31.7 หน่อ อัตราการแตกหน่อ 3.9 หน่อต่อต้นต่อเดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอาหารสูตรอื่น ๆ ส่วนการเพิ่มปริมาณหน่อ พบว่าอาหารเหลวสูตร 1/2MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวและโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) ส่งเสริมการแตกหน่อสูงสุด 47.3 หน่อ แต่หน่อนั้นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอาหารเหลวสูตร 1/2MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อย้ายหน่อกล้วยที่ได้ไปเลี้ยงในอาหารแข็งสูตร MS เติมกรดอินโดล-3-บิวทีริก (indole-3-butyric acid: IBA) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถชักนำรากได้ 100 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งเมื่อย้ายต้นกล้วยเหล่านี้ออกปลูก พบว่ามีอัตราการรอดชีวิต 100 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการขยายพันธุ์กล้วยนาในหลอดทดลองสามารถเพิ่มปริมาณต้นกล้วยนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ในการผลิตกล้วยนาเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การขยายพันธุ์ในหลอดทดลอง อัตราการแตกหน่อ ภาวะบวมน้ำของเซลล์พืช

¹ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

* Corresponding author e-mail: sratre@wu.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.265150>

Received: 27 October 2024, Revised: 29 January 2025, Accepted: 4 February 2025

Abstract

Banana NAK (*Musa acuminata* cv Red Dacca) is a rare and highly nutritious fruit. Conventional propagation through suckers is insufficient for large-scale commercial cultivation. This study focuses on an efficient method for *in vitro* propagation of this banana species. Trimmed suckers were sterilized with 25% and 10% Clorox for 35 and 15 minutes, respectively, and cultured on solid Murashige and Skoog (MS) medium supplemented with 3 and 5 mg/L of benzyladenine (BA), with or without 100 mL of coconut water, to induce shoot formation. After four months of culture, MS medium supplemented with 5 mg/L BA and 100 mL coconut water produced the highest shoot induction, averaging 31.7 shoots with a monthly shoot rate of 3.9, which was significantly different from the other treatments. For multiple shoot induction, 1/2MS liquid medium supplemented with 3 mg/L BA, coconut water and polyvinylpyrrolidone (PVP) achieved the highest shoot multiplication, 47.3 shoots per explant, which was not significantly different from the treatment containing 5 mg/L BA. When shoots were transferred to solid MS medium containing 1 mg/L IBA (Indole-3-butyric acid), 100% rooting was achieved. Furthermore, the plants acclimatized successfully with a survival rate of 100% upon transplantation. The result of this research indicate that *in vitro* propagation can effectively enhance the production of banana NAK, supporting its commercial cultivation.

Keywords: *In vitro* propagation, Multiplication rate, Hyperhydricity

บทนำ

กล้วยเป็นพืชที่เคียงคู่สังคมและวัฒนธรรมไทยมายาวนาน เป็นอาหารที่มีคุณค่าสำหรับคนทุกวัย ทุกส่วนของกล้วยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใบใช้ทำบายศรีหรือท่อนม ลำต้นใช้สำหรับการตั้งเครื่องบวงสรวงหรืองานมงคล ผลใช้เป็นอาหารและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น แป้งกล้วย เป็นต้น (ชุดิมา, 2565) กล้วย 1 ผล ให้พลังงานประมาณ 100 แคลอรี กล้วยมีน้ำตาลจากธรรมชาติ 3 ชนิด คือ ซูโครส ฟรุคโตส และกลูโคส ซึ่งช่วยเพิ่มพลังงานให้แก่ร่างกาย กล้วยเป็นผลไม้ที่อุดมด้วยวิตามินและแร่ธาตุ เช่น ธาตุเหล็ก ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียม รวมไปถึงคาร์โบไฮเดรต โปรตีน วิตามินเอ วิตามินบี 6 วิตามินบี 12 และวิตามินซี ที่ช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน (ผกาพรรณ และจินตนา, 2563) กล้วยมีสารไฟโตเคมีคัล (phytochemicals) ที่ช่วยต่อต้านอนุมูลอิสระ ชะลอความแก่ ป้องกันมะเร็ง ช่วยลดความเครียด เนื่องจากในกล้วยมีสารทริปโตเฟน (tryptophan) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่ร่างกายสามารถเปลี่ยนให้เป็นสารเซโรโทนิน (serotonin) ที่จะช่วยให้อารมณ์ผ่อนคลายและปรับอารมณ์ให้ดีขึ้น (อรพิน และคณะ, 2563)

กล้วยนาที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Musa acuminata* cv Red Dacca อยู่ในกลุ่มย่อยคาเวนดิช (Cavendish banana) ลักษณะประจำพันธุ์ของกล้วยนาเป็นกล้วยที่มีเปลือกสีแดงคล้ำ ผลเล็กกว่า

กล้วยหอมเขียว เมื่อสุกเนื้อจะมีสีเหลืองครีมหรือสีเหลืองอมชมพู นุ่มและหวานกว่ากล้วยพันธุ์อื่นในกลุ่มคาเวนดิช (Swangpol *et al.*, 2016) กล้วยนาเป็นกล้วยที่มีลำต้นเทียมสูงประมาณ 4 เมตร อายุการให้ผลผลิต 12-14 เดือน เป็นกล้วยที่มีสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นเม็ดสีจากพืชที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงมากกว่ากล้วยทั่วไป (Zamarripa, 2019) จากคุณค่าทางโภชนาการที่โดดเด่นของกล้วยนาทำให้กล้วยนาเป็นผลไม้ทางเลือกที่มีคุณภาพและแปลกใหม่ทั้งในตลาดท้องถิ่นและตลาดทั่วโลก (Red banana produce market, 2023) การขยายพันธุ์กล้วยนาโดยทั่วไปใช้วิธีการแยกหน่อ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ต้นพันธุ์จำนวนจำกัด ในทางการค้าจึงต้องใช้วิธีการขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

การขยายพันธุ์กล้วยด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อโดยทั่วไปสามารถใช้อาหารสูตรดัดแปลง Murashige and Skoog (1962) หรือ 1/2MS ที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดต่าง ๆ เช่น การศึกษาของ Prabhuling and Sathyanarayana (2017) รายงานการเพาะเลี้ยงหน่อกล้วยแกรนเนนด้วยการเริ่มต้นเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Murashige and Skoog (MS) ที่เติม 6-เบนซิลอะมิโนพิวรีน (6-Benzylaminopurine: BAP) ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และอะดีนีนซัลเฟต (adenine sulphate) ความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วจึงตัดแต่งเนื้อเยื่อส่วนที่มีสีน้ำตาลทิ้งแล้วย้ายไปยังอาหารกึ่งแข็งที่เติม BAP ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และอะดีนีนซัลเฟต ความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาความหนาแน่นที่เหมาะสมของหน่อกล้วยในภาชนะเพาะเลี้ยงเพื่อลดต้นทุนทางการค้า การศึกษาของ Mardhikasari *et al.* (2020) รายงานการเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยโดยใช้น้ำมะพร้าวความเข้มข้น 50 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับปุ๋ยทางใบและอาหารสูตร MS พบว่าการเติมน้ำมะพร้าวความเข้มข้น 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้กล้วยมีการเจริญเติบโตดี การศึกษาของอรพิน และคณะ (2563) รายงานการศึกษาความเข้มข้นของน้ำมะพร้าวที่เหมาะสมต่อการแตกหน่อของกล้วยนาภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ โดยนำชิ้นส่วนปลายยอดเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหารแข็ง MS ที่เติมน้ำมะพร้าวความเข้มข้นแตกต่างกัน 4 ระดับ และย้ายเลี้ยงทุกเดือนเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าอาหารสูตร MS ที่เติมน้ำมะพร้าวความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้จำนวนหน่อเฉลี่ยสูงสุด 8.25 หน่อต่อยอดที่เพาะเลี้ยง และความยาวยอดเฉลี่ยสูงสุด 7.73 เซนติเมตร การศึกษาของ Muhammad *et al.* (2007) รายงานผลของ BAP และไคเนติน (kinetin) อย่างเดียวและร่วมกับกรดอินโดลแอซิดิก (indoleacetic acid: IAA) ในการเพาะเลี้ยงยอดของ 'Basrai' (*Musa* spp. กลุ่ม AAA) โดยตัดแต่งหน่อให้มีขนาด 4-6 มิลลิเมตร เพาะเลี้ยงในอาหารแข็งหรืออาหารเหลวสูตร MS ที่เติม BAP และไคเนติน ความเข้มข้น 0-8 มิลลิกรัมต่อลิตร นับจำนวนยอดที่งอกใหม่จากแต่ละชิ้นส่วนของพืช พบว่าอัตราการขยายพันธุ์ขึ้นอยู่กับชนิดของไซโตไคนิน ความเข้มข้น และชนิดของอาหารที่ใช้ โดยอาหารเหลวที่เติม BAP ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ IAA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพดีที่สุด

การขยายพันธุ์กล้วยนาด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อประสบกับปัญหาการสร้างสารสีน้ำตาลซึ่งอาจมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการเพิ่มปริมาณของหน่อกล้วย การศึกษาของ Titov *et al.* (2006) รายงานการใช้สารโพลีไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) โพแทสเซียมซิเตรต (potassium citrate) และซิเตรต (citrate) จุ่มแช่ชิ้นส่วนหน่อกล้วยเพื่อล้างเนื้อเยื่อก่อนการเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรต่าง ๆ และการเติมสารดังกล่าวลงในอาหารและการตัดเนื้อเยื่อกล้วยในสารละลายก่อนนำไปเพาะเลี้ยง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการสร้างสารสีน้ำตาลใน

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วย และช่วยให้ชิ้นส่วนกล้วยเจริญเติบโตได้ดี การศึกษาของ Amente and Chimdessa (2021) รายงานว่าการเกิดสีน้ำตาลเป็นปัญหาอย่างหนึ่งในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชที่ ขัดขวางการขยายพันธุ์พืชในหลอดทดลอง เพื่อควบคุมปัญหาการสสารสีน้ำตาล จึงมีความพยายาม หลายวิธี เช่น การแช่ชิ้นส่วนพืชในสารละลายต้านอนุมูลอิสระ การผสมสารต้านอนุมูลอิสระในอาหาร เลี้ยงเชื้อ และการเพาะเลี้ยงในที่มืด สารต้านอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ เช่น PVP และกรดแอสคอร์บิก หรือ ใช้การผสมสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น PVP ความเข้มข้น 0.2-0.5 กรัมต่อลิตร ผสมกับกรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้น 15-250 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำในอาหารสูตร MS รองลงมาคือเติมถ่านกัมมันต์ และกรด ซิตริก เป็นต้น สารต้านอนุมูลอิสระเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการกำจัดออกซิเจนชนิดที่เกิดปฏิกิริยา การสสารสีน้ำตาล ซึ่งสารสีน้ำตาลดังกล่าวจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ โดยความเข้มข้นที่ใช้ ในอาหารเลี้ยงเนื้อเยื่อขึ้นอยู่กับชนิดพืช (Sudheer *et al.*, 2022)

ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของอาหารแข็งสูตร MS และอาหารเหลว สูตร 1/2MS ที่เติมเบนซิลอะดีนีน (benzyladenine: BA) ความเข้มข้นต่าง ๆ ร่วมกับการเติมหรือไม่เติมน้ำมะพร้าวและ PVP เพื่อศึกษาพัฒนาการและการชักนำการเพิ่มปริมาณหน่อกล้วยนาก และ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับส่งเสริมให้เกษตรกรได้นำกล้วยนากไปปลูกในเชิงการค้าต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุพืช

นำหน่อกล้วยนากขนาดความสูง 40 เซนติเมตร มาตัดแต่งให้มีขนาดประมาณ 10 x 10 เซนติเมตร ก่อนนำไปล้างด้วยน้ำประปาจนสะอาด ลอกกาบชั้นนอกออก นำมาฟอกฆ่าเชื้อด้วยการแช่ ในแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2 นาที ฟอกครั้งที่ 1 ด้วยคลอรีน (Clorox) ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับทวิน-20 จำนวน 2 หยด เป็นเวลา 35 นาที ทำการตัดแต่งชิ้นส่วน หน่อและลอกกาบในตู้ปลอดเชื้อ ก่อนฟอกฆ่าเชื้อซ้ำอีกครั้งด้วยคลอรีนความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับทวิน-20 จำนวน 2 หยด เป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ และตัดแต่งชิ้นส่วนให้มีขนาดประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร เพาะเลี้ยงชิ้นส่วนหน่อกล้วยนากบนอาหาร สูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส ให้แสง 14 ชั่วโมง ต่อวัน ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ บันทึกเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนหลังเพาะเลี้ยง 2 สัปดาห์

2. ผลของ BA และน้ำมะพร้าวต่อการพัฒนาของหน่อกล้วยนาก

ย้ายเลี้ยงชิ้นส่วนหน่อกล้วยนากจากวิธีที่ 1 มาเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร MS 4 สูตร ดังนี้

- 1) สูตร MS+3BA คือ อาหารแข็งสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) สูตร MS+3BA+CW คือ อาหารแข็งสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าว (coconut water: CW) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 3) สูตร MS+5BA คือ อาหารแข็งสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4) สูตร MS+5BA+CW คือ อาหารแข็งสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร

วางแผนการศึกษาแบบแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomize design: CRD) หน่วยการทดลองละ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 4 หน่อ เพาะเลี้ยงหน่อกล้วยในขวดแก้วขนาด 120 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหาร 15 มิลลิลิตร เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ที่ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ บันทึกจำนวนหน่อที่เพิ่มขึ้นทุก 1 เดือน เป็นเวลา 4 เดือน ย้ายเลี้ยงในอาหารใหม่สูตรเดิมเดือนละครั้ง โดยมีการตัดแบ่งหน่อกล้วยและลอกกาบใบก่อนการย้ายเลี้ยง

3. ผลของ BA และ PVP ต่อการเพิ่มปริมาณหน่อกล้วยนาถ

ย้ายเลี้ยงหน่อกล้วยนาถที่เลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร MS เดิม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตัดแต่งและลอกกาบให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตรก่อนเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร 1/2MS 4 สูตร ดังนี้

1) สูตร 1/2MS+3BA+CW คือ อาหารเหลวสูตร 1/2MS เดิม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2) สูตร 1/2MS+3BA+CW+PVP คือ อาหารเหลวสูตร 1/2MS เดิม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ PVP ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) สูตร 1/2MS+5BA+CW คือ อาหารเหลวสูตร 1/2MS เดิม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร (1/2MS+5BA+CW)

5) สูตร 1/2MS+5BA+CW+PVP คือ อาหารเหลวสูตร 1/2MS เดิม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ PVP ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

วางแผนการศึกษแบบแบบสุ่มสมบูรณ์ หน่วยการทดลองละ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 4 หน่อ เพาะเลี้ยงหน่อกล้วยในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหาร 25 มิลลิลิตร เพาะเลี้ยงด้วยการเขย่าที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ที่ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ บันทึกจำนวนหน่อที่เพิ่มขึ้นทุก 20 วัน เป็นเวลา 80 วัน โดยตัดแบ่งหน่อกล้วยและลอกกาบใบก่อนการย้ายเลี้ยงในอาหารใหม่สูตรเดิมทุก 20 วัน เมื่อหน่อกล้วยนาถมีความสูงประมาณ 1 นิ้ว จึงย้ายไปเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร MS ที่เติมกรดอินโดล-3-บิวทีริก (indole-3-butyric acid: IBA) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อชักนำราก เมื่อเนื้อเยื่อมีรากพัฒนาน้อย 1 ราก จึงออกปลูกเพื่ออนุบาลในสภาพแปลงโดยการล้างรากแล้วนำหน่อกล้วยปลูกลงในกระถาง 4 นิ้ว ใช้พีทมอส (peat moss) เป็นวัสดุปลูก รดน้ำให้ชุ่มและควบคุมความชื้นด้วยการคลุมถุงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เพาะเลี้ยงภายในโรงเรือนพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อครบ 2 สัปดาห์ จึงเปิดถุงและดูแลด้วยการรดน้ำวันละครั้ง

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

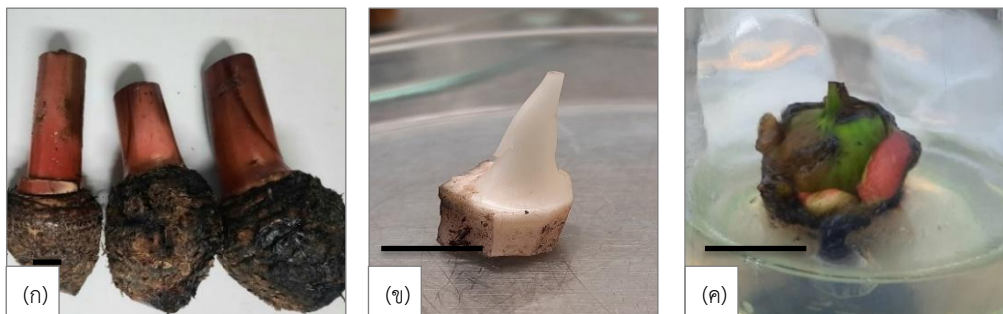
วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 22.0

ผลการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุพืช

การตัดแต่งและฟอกฆ่าเชื้อหน่อกล้วยนาถโดยการจุ่มแช่ในแอลกอฮอล์ แล้วตามด้วยการฟอกด้วยคลอรีนความเข้มข้นแตกต่างกันจำนวน 2 ครั้ง ก่อนล้างด้วยน้ำกลั่นหนึ่งฆ่าเชื้อและตัดแต่งชิ้นส่วนอีกครั้งก่อนนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร MS เดิม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตการปนเปื้อนเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าเนื้อเยื่อไม่มีการปนเปื้อน 100 เปอร์เซ็นต์ แต่หน่อ

ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหารแข็งดังกล่าวมีสารสีน้ำตาลที่ปลดปล่อยออกมาจากแผลของรอยตัด ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเตรียมหน่อกล้วยนาเพื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง ๆ (แถบสเกล (scale bar) แทนระยะ 1 เซนติเมตร) หน่อกล้วยนาจากแปลงปลูกที่ได้รับการตัดแต่งก่อนการฟอกฆ่าเชื้อ (ก) หน่อที่ผ่านการฟอกฆ่าเชื้อ (ข) และหน่อที่เลี้ยงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ (ค)

2. ผลของ BA และน้ำมะพร้าวต่อการพัฒนาของหน่อกล้วยนา

หลังเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนกล้วยนา จำนวน 1 หน่อต่อขวด บนอาหารแข็งสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าในเดือนที่ 1 จำนวนหน่อกล้วยนาในทุกสูตรอาหารไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในเดือนที่ 2 3 และ 4 การเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนกล้วยนาบนอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร ชักนำการสร้างหน่อและส่งเสริมอัตราการแตกหน่อเฉลี่ยในแต่ละเดือนสูงสุด คือ 31.7 หน่อ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอาหารสูตรอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอาหารสูตรที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งเสริมการแตกหน่อกล้วยนามากกว่าอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และการเติมน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งเสริมการแตกหน่อของกล้วยนามากกว่าอาหารสูตรที่ไม่เติมน้ำมะพร้าว ดังตารางที่ 1

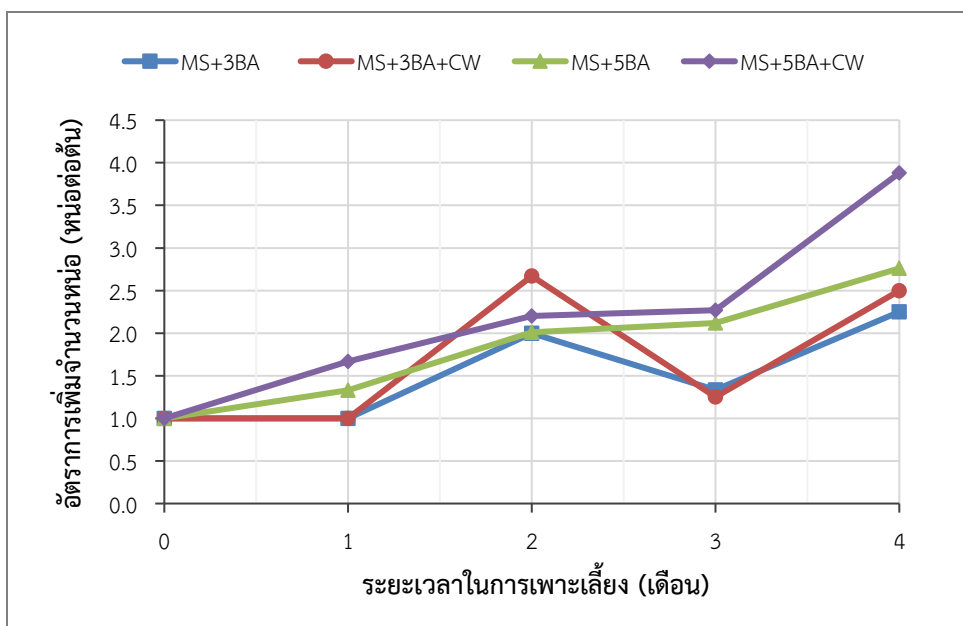
ตารางที่ 1 จำนวนหน่อเฉลี่ยของหน่อกล้วยนาที่เพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 4 เดือน

สูตรอาหาร	จำนวนยอด (หน่อต่อต้นต่อเดือน)				ลักษณะของหน่อ
	เดือนที่ 1	เดือนที่ 2	เดือนที่ 3	เดือนที่ 4	
MS+3BA	1.0±0.0 ^a	2.0±0.0 ^a	2.8±0.3 ^a	6.0±0.9 ^a	ปกติ
MS+3BA+CW	1.0±0.0 ^a	2.7±0.0 ^a	3.3±0.3 ^a	8.3±0.9 ^{ab}	ปกติ
MS+5BA	1.3±0.3 ^a	2.7±0.3 ^a	5.7±0.3 ^{bc}	15.7±1.9 ^c	ปกติ
MS+5BA+CW	1.7±0.3 ^a	3.7±0.3 ^b	8.3±1.2 ^c	31.7±3.0 ^d	ปกติ
F-test	ns	*	*	*	
CV (%)	25.5	18.3	20.5	16.2	

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

- * และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ns ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้พบว่าอาหารเชิงสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร ชักนำการเพิ่มจำนวนหน่อเฉลี่ยในเดือนที่ 1 2 3 และ 4 สูงที่สุดเท่ากับ 0.7 2.0 4.7 และ 23.3 หน่อต่อการเพาะเลี้ยงเริ่มต้น 1 หน่อ ตามลำดับ มีอัตราการแตกหน่อต่อต้นต่อเดือนสูงกว่าอาหารสูตรอื่น โดยจะเห็นได้ว่าในเดือนที่ 4 หน่อกล้วย 1 หน่อที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรดังกล่าว มีอัตราการแตกหน่อ 3.9 หน่อต่อต้นต่อเดือน ในขณะที่อาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร อาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และอาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราการแตกหน่อ 2.8 2.5 และ 2.3 หน่อต่อต้นต่อเดือน ตามลำดับ ดังภาพที่ 2

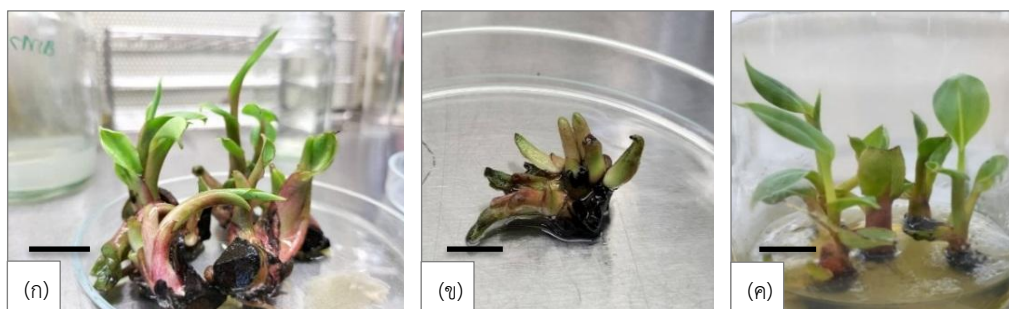


ภาพที่ 2 อัตราการเพิ่มจำนวนหน่อกล้วยขนาดเฉลี่ยต่อต้นต่อเดือน เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารเชิงสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 4 เดือน

3. ผลของ BA และ PVP ต่ออัตราการเพิ่มปริมาณหน่อกล้วยขนาด

เมื่อนำหน่อกล้วยขนาดที่เลี้ยงบนอาหารเชิงสูตร MS เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 80 วัน พบว่าหน่อที่ชักนำได้จากอาหารเหลวสูตร 1/2MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวและเติมหรือไม่เติม PVP หน่อกล้วยมีลักษณะปกติ ไม่มีลักษณะบวมน้ำ ในขณะที่หน่อกล้วยที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร 1/2MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวและเติมหรือไม่เติม PVP มีลักษณะบวมน้ำ

(hyperhydricity) บวม กรอบ และมีอัตราการเพิ่มปริมาณหน่อใหม่ลดลง (ภาพที่ 3) ซึ่งอาหารสูตร 1/2MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวและ PVP ชักนำอัตราการแตกหน่อได้สูงที่สุด เท่ากับ 47.3 หน่อต่อ 1 หน่อเริ่มต้น แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับอาหารเหลวสูตร 1/2MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 2) ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์อัตราการเพิ่มจำนวนหน่อต่อ 1 หน่อเริ่มต้น พบว่าหน่อกล้วยนาฬิกาที่เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร 1/2MS เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวและ PVP ให้อัตราการเพิ่มหน่อเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 2.7 หน่อต่อการเพาะเลี้ยง 20 วัน การทดลองในระยะเริ่มต้น 20 วันแรก หน่อกล้วยนาฬิกาที่เลี้ยงในอาหารสูตร 1/2MS เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ PVP ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการแตกหน่อ 3.3 หน่อ ซึ่งสูงกว่าสูตรอื่น แต่เมื่อเพาะเลี้ยงต่อเนื่องพบว่าหน่อมีลักษณะอวบน้ำและการแตกหน่อลดลง (ภาพที่ 4) เมื่อหน่อที่ชักนำได้มีความแข็งแรง ความสูงประมาณ 1 นิ้ว จึงตัดแยกเป็นหน่อเดี่ยว ๆ นำไปเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร MS ที่เติม IBA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อชักนำราก พบว่าหน่อกล้วยนาฬิกาสามารถพัฒนาเป็นต้นสมบูรณ์ มีการสร้างราก 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำออกปลูกในสภาพแปลงปลูกโดยใช้พีทมอส และคลุมถุงเพื่อรักษาความชื้น 2 สัปดาห์ ก่อนจะเปิดถุงเพื่อให้กล้วยนาฬิกาปรับตัวในสภาพแปลง สังเกตการรอดชีวิตเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าต้นกล้วยนาฬิกาที่รอดชีวิต 100 เปอร์เซ็นต์



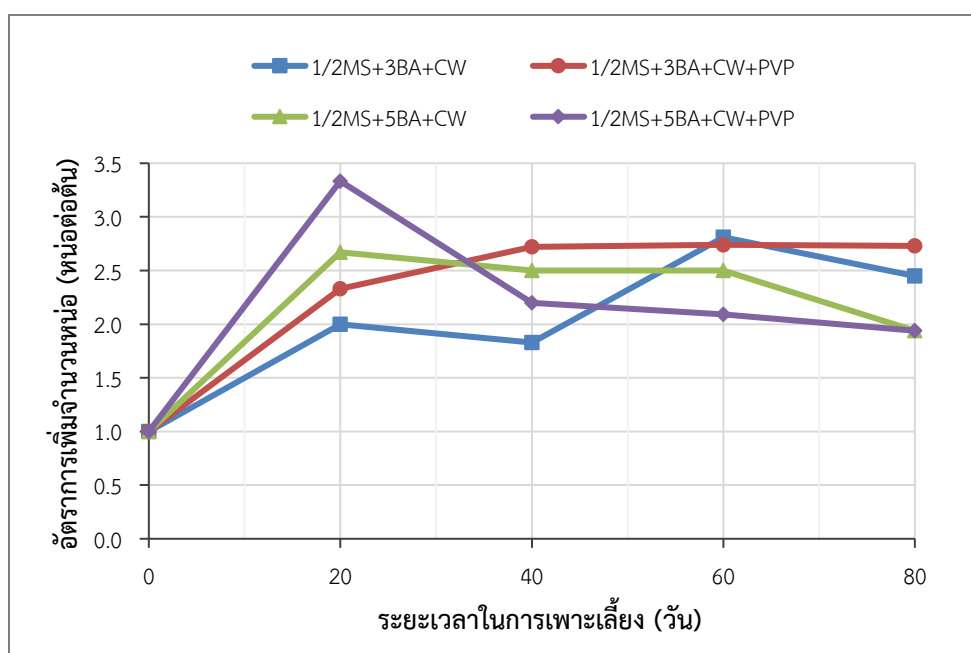
ภาพที่ 3 ลักษณะของหน่อกล้วยนาฬิกาหลังเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตรต่าง ๆ (แถบสเกล แทนระยะ 1 เซนติเมตร) ลักษณะหน่อปกติที่เพาะเลี้ยงบนอาหารเหลวสูตร 1/2MS+3BA+CW+PVP เป็นเวลา 80 วัน (ก) ลักษณะหน่ออวบน้ำที่เพาะเลี้ยงบนอาหารเหลวสูตร 1/2MS+5BA+CW+PVP เป็นเวลา 80 วัน (ข) และต้นที่ชักนำการสร้างรากบน อาหารแข็งสูตร MS+IBA เป็นเวลา 20 วัน (ค)

ตารางที่ 2 ผลของสูตรอาหารเหลวต่อการเพิ่มปริมาณหน่อกล้วยนากหลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 80 วัน

สูตรอาหาร	จำนวนหน่อ (หน่อต่อต้นต่อระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง (วัน))				ลักษณะของ หน่อ
	20	40	60	80	
1/2MS+3BA+CW	2.0±0.0 ^a	3.7±0.7 ^a	10.3±1.5 ^a	25.3±1.8 ^a	ปกติ
1/2MS+3BA+CW+PVP	2.3±0.3 ^a	6.3±0.7 ^{ab}	17.3±1.2 ^b	47.3±2.3 ^{bc}	ปกติ
1/2MS+5BA+CW	2.7±0.3 ^a	6.7±0.7 ^b	16.7±0.9 ^b	32.3±1.5 ^{ab}	อวบน้ำ
1/2MS+5BA+CW+PVP	3.3±0.3 ^a	7.3±0.7 ^b	15.3±0.9 ^b	29.7±1.5 ^a	อวบน้ำ
F-test	ns	*	*	*	
CV (%)	17.32	7.87	9.96	8.48	

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- * และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
- ns ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4 อัตราการเพิ่มจำนวนหน่อเฉลี่ยของกล้วยนาก เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 80 วัน

การอภิปรายผลการวิจัย

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยนากสามารถทำได้ด้วยการใช้หน่อมาตัดแต่งและฟอกฆ่าเชื้อ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ฟอกด้วยคลอรีนความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 35 นาที ก่อนนำมาลอกกาบออกด้วยเทคนิคปราศจากเชื้อในตู้ยาล้าง แล้วนำมาฟอกครั้งที่ 2 ด้วยคลอรีนความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 15 นาที และตัดแต่งเนื้อเยื่อด้วยการลอกกาบอีกครั้งให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร ก่อนเพาะเลี้ยง ซึ่งการฟอกฆ่าเชื้อด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้หน่อกล้วยปราศจากการปนเปื้อน 100 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับรายงานการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อไพลโดยใช้ชิ้นส่วนโรโซม ซึ่งทำการฟอกฆ่าเชื้อที่ผิวโรโซมจำนวน 2 ครั้ง ด้วยสารละลายคลอรีนความเข้มข้น 30 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 และ 10 นาที ตามลำดับ (รัตน และจิตรกร, 2562)

การเริ่มต้นเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยนากบนอาหารแข็งสูตร MS เต็ม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร หากเกิดการปนเปื้อนสามารถนำไปฟอกฆ่าเชื้อซ้ำได้และมีประสิทธิภาพกว่าการเลี้ยงในอาหารเหลว เนื่องจากลักษณะการปนเปื้อนของการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยจากเชื้อแบคทีเรียมีลักษณะเป็นโคโลนี (Permadi *et al.*, 2023) ซึ่งการเลี้ยงในอาหารเหลวมีผลให้แบคทีเรียซึ่งสัมผัสอยู่ที่เนื้อเยื่อของชิ้นส่วนกระจายตัวได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การปนเปื้อนของเนื้อเยื่อที่เพาะเลี้ยงในอาหารแข็งเป็นการปนเปื้อนจุดใดจุดหนึ่ง หรือมีโคโลนีเกิดขึ้นบนผิวอาหารหรือเนื้อเยื่อภายนอกสามารถนำเนื้อเยื่อมาตัดแต่งแล้วฟอกฆ่าเชื้อเพื่อเพาะเลี้ยงใหม่ได้ การเริ่มต้นเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนกล้วยบนอาหารแข็งเป็นการตรวจสอบการปนเปื้อนของเนื้อเยื่อในเบื้องต้นเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ ในกรณีที่เนื้อเยื่อพืชที่นำมาทดลองมีจำนวนจำกัด ซึ่งหลังจากทำให้เนื้อเยื่อปลอดเชื้อแล้วสามารถนำชิ้นส่วนกลับไปเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณหน่อต่อไปได้

การชักนำการเพิ่มปริมาณหน่อในอาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าว มีอัตราการแตกหน่อ 3.9 หน่อต่อต้นต่อเดือน สูงกว่าอาหารสูตรที่ไม่เติมน้ำมะพร้าว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมะพร้าวมีสารเคมีชีวภาพที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น วิตามิน แร่ธาตุ โปรตีน น้ำตาล และสารไซโตไคนิน ซึ่งสารไซโตไคนินเป็นส่วนประกอบที่น่าสนใจที่สุดชนิดหนึ่งที่พบในน้ำมะพร้าว (Lazim *et al.*, 2015) สอดคล้องกับรายงานการเพาะเลี้ยงกล้วยน้ำว้ามะลิองค์ที่มีอัตราการแตกหน่อ 2.6 หน่อต่อชิ้นส่วนในสูตรอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 150 มิลลิลิตร ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับสูตรที่เติม BA ความเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่สูตรอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสร้างจำนวนรากเฉลี่ยต่อต้นลดลง ในขณะที่สูตร MS เต็ม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนหน่อเฉลี่ย 1 หน่อต่อชิ้นส่วน (นิดาพร และคณะ, 2559)

หลังจากหน่อกล้วยมีการพัฒนาสามารถตัดแบ่งเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว ทั้งนี้เพื่อศึกษาอัตราการขยายพันธุ์สำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเพาะเลี้ยงด้วยระบบไบโอรีแอคเตอร์ (bioreactor) พบว่ากล้วยนากสามารถเจริญเติบโตในอาหารเหลวสูตร 1/2MS เต็ม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และ PVP ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการใช้ น้ำมะพร้าวปริมาตร 50-100 มิลลิลิตร เต็มในอาหาร 1 ลิตร เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยสายพันธุ์ Rajabulu (Mardhikasari *et al.*, 2020) แต่การเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MS เต็มสูตร ส่งผลให้เนื้อเยื่อมีลักษณะบวมน้ำและการเติม BA

ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลให้เนื้อเยื่อชะงักการเจริญเติบโต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของ BA สูงเกินไป ดังรายงานของ Suman (2017) ที่รายงานว่า การเติม BA ความเข้มข้น 22.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยมีผลยับยั้งการพัฒนาของหน่อและเนื้อเยื่อของหัว และใบระหว่างเนื้อเยื่อเจริญลดการเจริญเติบโต ในขณะที่กล้วยมีการเจริญเติบโตดีในอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยพบว่าเนื้อเยื่อมีการสร้างสารสีน้ำตาลซึ่งมีผลให้การแตกหน่อของกล้วยลดลง ในการทดลองนี้จึงได้เติม PVP ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระลงไป ในอาหารเหลวสูตร 1/2MS เพื่อลดการสร้างสารสีน้ำตาล การเติม PVP ความเข้มข้น 200-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อช่วยลดการสร้างสารสีน้ำตาลในเนื้อเยื่อกล้วย (Taghizadeh and Dastjerdi, 2020) สอดคล้องกับการศึกษาของ Amante and Chimdessa (2021) ซึ่งรายงานว่า การเติมสารต้านอนุมูลอิสระชนิด PVP ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้กวาดสเปนมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการสร้างสารสีน้ำตาลมากกว่าการเติมผงถ่าน หรือผงขมิ้นชัน การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยในอาหารเหลวต้องทำการตัดแบ่งเพื่อย้ายเลี้ยงในอาหารใหม่สูตรเดิมทุก 20 วัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพาะเลี้ยงนานเกินกว่า 20 วัน หน่อกล้วยมีจำนวนหนาแน่นและปริมาณอาหารอาจจะไม่เพียงพอ จึงต้องมีการย้ายเลี้ยงในอาหารใหม่

หลังจากเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยจนได้จำนวนตามต้องการสามารถตัดแยกหน่อแล้วนำไปเพาะเลี้ยงชักนำรากบนอาหารแข็งสูตร MS ที่เติม IBA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการชักนำรากบนอาหารสูตรดังกล่าวกล้วยมีการพัฒนาราก 100 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Kumar *et al.* (2012) ที่ทดลองชักนำรากกล้วยโดยเพาะเลี้ยงในอาหารสูตรชักนำรากที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิด IAA IBA และ 1-Naphthaleneacetic acid (NAA) พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยง 12 วัน สามารถกระตุ้นการเกิดราก 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้ต้นที่มีการพัฒนารากสมบูรณ์ ทำการล้างรากก่อนนำต้นกล้วยปลูกโดยใช้พีทมอสเป็นวัสดุปลูกและคลุมถุงเพื่อควบคุมความชื้นในระยะ 2 สัปดาห์ หลังออกปลูกด้วยวิธีการดังกล่าว พบว่าต้นอ่อนกล้วยนาฬิกาที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมีอัตราการรอดชีวิต 100 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Ahmed *et al.* (2014) ที่ศึกษาการออกปลูกกล้วยแกรนเนนจากการเพาะเนื้อเยื่อด้วยการปรับสภาพต้นกล้าในหลอดทดลองด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้รอดชีวิตสูงสุด (100 เปอร์เซ็นต์) พบว่าระหว่างการออกปลูกต้องต้องรักษาความชื้นด้วยการคลุมดินด้วยพลาสติก

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการชักนำรากกล้วยนาฬิกาด้วยการเลี้ยงในอาหารแข็งสูตร MS ที่เติม IBA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรเพียงสูตรเดียว เนื่องจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยชนิดอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการสามารถชักนำรากได้ในอาหารสูตรนี้ อย่างไรก็ตามในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยชนิดอื่น เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยเล็บมือนาง นั้น สามารถพัฒนารากได้เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่ไม่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต ยกเว้นกล้วยทองเส้าที่มีการพัฒนารากได้น้อย

สรุปผลการวิจัย

การขยายพันธุ์กล้วยนาฬิกาในสภาพปลอดเชื้อสามารถทำได้โดยการฟอกฆ่าเชื้อชิ้นส่วนหน่อกล้วย 2 ครั้ง ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อได้ 100 เปอร์เซ็นต์ การเพาะเลี้ยงหน่อกล้วยบนอาหารแข็งสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 เดือน ชักนำการสร้างหน่อได้สูงที่สุด 31.7 หน่อ สูงกว่าสูตรที่ไม่เติมน้ำมะพร้าว 2.02 เท่า หลังจากนั้นทำการ

เพิ่มปริมาณหน่อกล้วยในอาหารเหลวสูตร 1/2MS เดิม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ น้ำมะพร้าวปริมาตร 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ PVP ซึ่งพบว่าหน่อกล้วยที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร ดังกล่าวมีการแตกหน่อสูงกว่าสูตรที่ไม่เติม PVP 1.86 เท่า การเลี้ยงในอาหารเหลวสามารถนำไปปรับใช้ ในการผลิตกล้วยจำนวนมากซึ่งอาจจะทดลงเลี้ยงด้วยระบบไบโอรีแอคเตอร์ เพื่อลดต้นทุนด้านแรงงาน หรือการผลิตในเชิงพาณิชย์ เมื่อกล้วยแตกหน่อตามจำนวนที่ต้องการ ทำการย้ายไปเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เดิม IBA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อชักนำการสร้างรากและนำออกปลูกในสภาพแปลง พบว่าสามารถออกปลูกและรอดชีวิต 100 เปอร์เซ็นต์ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยจึงเป็นวิธีที่เหมาะสม ในการผลิตต้นพันธุ์กล้วยชนิดที่หาต้นพันธุ์ยากเพื่อให้ทันต่อความต้องการต้นพันธุ์ของเกษตรกร การศึกษาของรุจิรา (2566) รายงานต้นทุนการปลูกกล้วยหอมรอบระยะเวลาการปลูกในปี พ.ศ. 2564-2565 พบว่าจุดคุ้มทุนของราคาขายกล้วยหอมทอง 13.23 บาทต่อหัว อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน ในปีที่ 1 เท่ากับ 3.40 และในปีที่ 2 เท่ากับ 3.96 ต้นกล้วยจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมีราคา 12-20 บาท ไม่ต่างจากราคาหน่อกล้วยทั่วไป ดังนั้นการผลิตต้นพันธุ์กล้วยที่หายากด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ จึงช่วยสนับสนุนการปลูกในเชิงพาณิชย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามเกษตรกรต้องมีตลาดรองรับผลผลิต

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากโครงการบริการวิชาการ โครงการอนุรักษ์ พันธุ์กรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.)

เอกสารอ้างอิง

- ชุตินา กาบแก้ว. (2565). การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้ากึ่งสำเร็จรูปจากแป้งกล้วยน้ำว้าพันธุ์ มะลิอ่อน. *วารสารวิทยาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(2), 11-19.
- นิตาพร สุธิญญรัตน์ สุพรรณิ อะโอกิ และขวัญเดือน รัตนนา. (2559). การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและการ วิเคราะห์ความคงตัวของระดับพลอยด์ดีของกล้วยน้ำว้ามะลิอ่อน. *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*, 9(3), 1-14.
- ผกาพรรณ บุญเต็ม และจินตนา อาจสันเทียะ. (2563). ประโยชน์ของกล้วยต่อสุขภาพ. *APHEIT Journal of Nursing and Health*, 2(1), 20-29.
- รัตนา ขามฤทธิ์ และจิตรกร ปรีแมน. (2562). การฟอกฆ่าเชื้อที่ผิวและการชักนำให้เกิดขึ้นจากไรโซม ของไพลินหลอดทดลอง. *แก่นเกษตร*, 47(1), 1393-1398.
- รุจิรา แสงแข. (2566). การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนจากการปลูกกล้วยหอมทองปลอดสารพิษ ใน เขตพื้นที่อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารลวศรี*, 7(1), 122-137.
- อรพิน เสละคร สุดารัตน์ สุดพันธ์ คงเดช พะสีนาม และฉันทมาส กาศสนุก. (2563). ความเข้มข้นของ น้ำมะพร้าวที่เหมาะสมต่อการแตกยอดของกล้วยนาภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ. *วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มจร.*, 5(1), 28-33.
- Ahmed, S., Sharma, A., Bhushan, B., Wali, V.K., Bakshi, P. and Singh, A.K. (2014). Studies on hardening and acclimatization of micropropagated plantlets of banana cv. Grand Naine. *The Bioscan*, 9(3), 965-967.

- Amente, G. and Chimdessa, E. (2021). Control of browning in plant tissue culture: A review. *Journal of Scientific Agriculture*, 5(1), 67-71, doi: <https://doi.org/10.25081/jsa.2021.v5.7266>.
- Kumar, A., Kumari, P. and Shukla, L.N. (2012). *In vitro* rooting in the tissue culture raised plantlets of Malbhog cultivar of banana. *Indian Journal of Innovations and Developments*, 1(9), 665-668.
- Lazim, M.I.M., Badruzaman, N.A., Peng, K.S. and Long, K. (2015). Quantification of cytokinins in coconut water from different maturation stages of Malaysia's coconut (*Cocos nucifera* L.) varieties. *Journal of Food Processing and Technology*, 6(11), doi: <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000515>.
- Mardhikasari, S., Yunus, A. and Samanhudi, S. (2020). Modification of media for banana in vitro propagation with foliar fertilizer and coconut water in cv. Rajabulu. Caraka Tani: *Journal of Sustainable Agriculture*, 35(1), 23-32, doi: <https://doi.org/10.20961/carakatani.v35i1.27756>.
- Muhammad, A., Rashid, H., Hussain, I. and Naqvi, S.M.S. (2007). Proliferation-rate effects of BAP and kinetin on banana (*Musa* spp. AAA Group) 'Basrai'. *HortScience*, 42(5), 1253-1255, doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1253>.
- Murashige, T. and Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
- Permadi, N., Nurzaman, M., Alhasnawi, A.N., Doni, F. and Juliaha, E. (2023). Managing lethal browning and microbial contamination in *Musa* spp. tissue culture: Synthesis and perspectives. *Horticulturae*, 9(4), 453, doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040453>.
- Prabhuling, G. and Sathyanarayana, B.N. (2017). Optimization of explants density for tissue culture propagation of banana cv. 'GRANDE NAIN'. *International Journal of Agricultural Sciences*, 13(1), 71-76, doi: <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAS/13.1/71-76>.
- Red Banana Produce Market. (2023). *Global red banana produce market research report-segmented by nature (organic and conventional); distribution channel (supermarket/hypermarkets, speciality stores, and online retail); and region-size, share, growth analysis |forecast (2023-2030)*. Retrieved 31 December 2024, from: <https://virtuemarketresearch.com/report/red-banana-produce-market>.

- Sudheer, W.N., Praveen, N., Al-Khayri, J.M. and Jain, S.M. (2022). Role of plant tissue culture medium components. In Chandra Rai, A., Kumar, A., Modi, A., and Singh, M. (Eds.). *Advances in plant tissue culture: Current developments and future trends*, pp. 51-83. Massachusetts: Academic Press.
- Suman, S. (2017). Plant tissue culture: A promising tool of quality material production with special reference to micropropagation of banana. *Biochemical and Cellular Archives*, 17(1), 1-26.
- Swangpol, S.C., Viboonjun, U., Kongsawadworakul, P., Chuenwarin, P., Inta, W. and Traiperm, P. (2016). Taxonomic notes on ornamental bananas in Thailand. In *International Symposium on Tropical and Subtropical Ornamentals 1167*, (pp. 169-176). Leuven: International Society for Horticultural Science.
- Taghizadeh, M. and Dastjerdi, M.G. (2020). Inhibition of browning problem during the callogenesis of *Spartium junceum* L. *Ornamental Horticulture*, 27, 68-77, doi: <https://doi.org/10.1590/2447-536x.v27i1.2230>.
- Titov, S., Bhowmik, S.K., Mandal, A., Alam, S. and Uddin, S.N. (2006). Control of phenolic compound secretion and effect of growth regulators for organ formation from *Musa* spp. cv. Kanthali floral bud explants. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2(3), 97-104, doi: <https://doi.org/10.3844/ajbbbsp.2006.97.104>.
- Zamarripa, M. (2019). 7 Red banana benefits (and how they differ from yellow ones). Retrieved 31 December 2024, from: <https://www.healthline.com/nutrition/red-bananas>.

การศึกษาโปรไฟล์และความสัมพันธ์ของสารเมแทบอลิต์ในสาหร่ายทะเล
Sargassum polycystum *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri*
 A Study of Metabolite Profiles and Relationships in the Seaweeds
Sargassum polycystum, *Caulerpa lentillifera* and *Gracilaria fisheri*

อรัชพร ทองโอหาร^{1,2} ทิวิวัฒน์ นาพิรุณ¹ และสุเพญญา จิตตพันธ์^{1,2*}
 Arachaporn Thong-olarn^{1,2}, Tiwtawat Napirorn¹ and Supenya Chittapun^{1,2*}

บทคัดย่อ

สาหร่ายทะเลมีความหลากหลายทางชีวภาพสูงและผลิตสารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาในหลากหลายอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์โปรไฟล์และความสัมพันธ์ของสารเมแทบอลิต์ที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิก (lipophilic) ของสาหร่ายทะเล 3 ชนิดที่พบในประเทศไทย ได้แก่ *Sargassum polycystum* *Caulerpa lentillifera* และ *Gracilaria fisheri* โดยนำสาหร่ายทั้งสามชนิดมาแช่หมักด้วยเมทานอลและแยกสารด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนต่อเอทิลอะซิเตท (อัตราส่วน 85-95:15-5 โดยปริมาตร) ประเมินความสัมพันธ์ขององค์ประกอบด้วยการจัดกลุ่ม (cluster analysis) และ principal component analysis (PCA) ผลการศึกษาพบสารเมแทบอลิต์ 112 ชนิด จัดกลุ่มตามโครงสร้างทางเคมีได้ 26 กลุ่ม สารสำคัญหลักในสาหร่ายทะเล *S. polycystum* และ *C. lentillifera* คือ สเตียรอยด์ (24 และ 23 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ) ในขณะที่ *G. fisheri* มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์เป็นสารเด่น (21 เปอร์เซ็นต์) การวิเคราะห์พบความคล้ายคลึงขององค์ประกอบสารเมแทบอลิต์หลักระหว่าง *S. polycystum* และ *C. lentillifera* ซึ่งแตกต่างจาก *G. fisheri* และระบบตัวทำละลายนี้สามารถแยกสารกลุ่มกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์จาก *S. polycystum* ในส่วนสารสกัดแบบส่วนที่ 2 และสเตียรอยด์จาก *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ในส่วนสารสกัดแบบส่วนที่ 3 งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิดในฐานะวัตถุดิบสำหรับการสกัดสารเมแทบอลิต์ และแสดงให้เห็นว่าข้อมูลความสัมพันธ์ของสารเมแทบอลิต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการสกัด อันจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อีกในอนาคต

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

² หน่วยงานวิจัยสาหร่ายและแพลงก์ตอน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* Corresponding author e-mail: supenyac@tu.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.265605>

Received: 9 December 2024, Revised: 30 January 2025, Accepted: 10 February 2025

คำสำคัญ: สาหร่ายทะเล การแยกส่วน สารสกัดหยาบลิปอฟิลิก โครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี การจัดกลุ่ม

Abstract

Seaweeds exhibit high biodiversity and produce secondary metabolites with potential applications in various industries. This study aims to analyze the profiles and relationships of metabolites extracted from the lipophilic fractions of three seaweed species commonly found in Thailand, including *Sargassum polycystum*, *Caulerpa lentillifera*, and *Gracilaria fisheri*. The seaweeds were extracted using methanol and fractionated by column chromatography with hexane:ethyl acetate as the solvent system at ratios ranging from 85-95:15-5 (%v/v). Chemical compositions were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and their relationships were assessed using cluster analysis and Principal Component Analysis (PCA). A total of 112 metabolites were identified and classified into 26 major groups according to their chemical structures. Steroids were the dominant compounds in *S. polycystum* and *C. lentillifera* (24% and 23%, respectively), whereas unsaturated fatty acid esters were predominant in *G. fisheri* (21%). Cluster analysis and PCA revealed similarities in the key metabolite compositions of *S. polycystum* and *C. lentillifera*, which were distinct from those of *G. fisheri*. This solvent system effectively isolated unsaturated fatty acid esters in Fraction 2 of *S. polycystum* and steroids in Fraction 3 from both *C. lentillifera* and *G. fisheri*. This research highlights the potential of these three seaweed species as raw materials for metabolite extraction and demonstrates that metabolite relationship data can be applied to optimize extraction processes, paving the way for product development in various industries.

Keywords: Seaweeds, Fractionation, Lipophilic crude extract, Gas chromatography-mass spectrometry, Cluster analysis

บทนำ

สาหร่ายทะเลเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูง และสร้างสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (secondary metabolites) ที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันซึ่งมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงเป็นจำนวนมาก (Cornish and Garbary, 2010) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้รายงานสารเมแทบอไลต์จากสาหร่ายทะเลที่มีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น แอสตาแซนธิน (astaxanthin) เป็นสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) (สายัณห์ และคณะ, 2566) มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าวิตามินอี 500 เท่า มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Elbahnaswy and Elshopakey,

2024) และสามารถลดการแสดงออกและกิจกรรมของเอนไซม์เมทริกซ์เมทัลโลโปรตีนเนส (matrix metalloproteinases: MMPs) ซึ่งส่งผลทำให้สามารถป้องกันริ้วรอยที่เกิดจากแสงยูวีได้ (Imokawa, 2019) และฟูโคแซนทิน (fucoxanthin) เป็นสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ฤทธิ์ต้านการอักเสบ (anti-inflammatory) (Kumarasinghe and Gunathilaka, 2024) และมีฤทธิ์ต้านเบาหวาน (anti-diabetic) ซึ่งมีส่วนช่วยในการชะลอกระบวนการสะสมไขมันในเซลล์ (Sayuti *et al.*, 2023) จากคุณสมบัติของสารเมแทบอลิต์ต่าง ๆ ทำให้นิยมนำสารสกัดจากสาหร่ายทะเลมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์และอาหารเสริม นอกจากนี้สาหร่ายทะเลยังมีกรดไฮยาลูรอน (hyaluronic acid) ซึ่งเป็นสารช่วยรักษาความชุ่มชื้น (Farage *et al.*, 2007) ซึ่งนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางอีกด้วย

การสกัดสารเมแทบอลิต์จากสาหร่ายทะเลมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การสกัดด้วยเอนไซม์ การสกัดด้วยคลื่นความถี่สูง การสกัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ การสกัดด้วยของไหลความดันสูง และการสกัดสารด้วยของไหลวิกฤตยิ่งยวด (Batool and Menaa, 2020) การเลือกวิธีการสกัดสารจากสาหร่ายทะเลควรพิจารณาถึงคุณสมบัติของสารเป้าหมายที่ต้องการ จากงานวิจัยที่ผ่านมา การสกัดสารจากสาหร่ายทะเลใช้วิธีที่หลากหลาย เช่น การสกัดฟูโคแซนทินจากสาหร่าย *Undaria pinnatifida* ใช้วิธีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (supercritical CO₂ extraction) มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งไม่ทำให้สารเสื่อมสภาพจากความร้อนและมีสิ่งเจือปนน้อยทำให้ง่ายต่อการทำให้บริสุทธิ์ (Yin *et al.*, 2022) การสกัดสารฟีนอลิกจากสาหร่ายทะเล *Sargassum polycystum* ด้วยตัวทำละลายต่างกัน พบว่าการสกัดด้วยอะซิโตน 70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ปริมาณสารฟีนอลิกมากที่สุด รองลงมา คือ สารละลายอะซิโตน 50 เปอร์เซ็นต์ และเอทิลอะซิเตท 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายที่แตกต่างกันสามารถสกัดสารจากสาหร่ายทะเลได้ปริมาณแตกต่างกัน (Wu *et al.*, 2022) ฉะนั้นการพัฒนาวิธีการแยกสาร (fractionation) ที่มีประสิทธิภาพ จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการแยกสารสำคัญและลดความซับซ้อนของกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งการพัฒนากระบวนการแยกสารนั้นต้องอาศัยข้อมูลชนิดของสารเมแทบอลิต์ที่สกัดได้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการแยกสาร อันจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาสารจากสาหร่ายในอนาคต จากการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบเฉพาะในสาหร่ายทะเลแต่ละชนิด ยังขาดการศึกษาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเมแทบอลิต์ระหว่างสาหร่ายกลุ่มต่าง ๆ ซึ่งโปรไฟล์และความสัมพันธ์ขององค์ประกอบเมแทบอลิต์ระหว่างสาหร่ายกลุ่มต่าง ๆ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกชนิดของสาหร่ายที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสารสำคัญ รวมทั้งข้อมูลความสัมพันธ์ของเมแทบอลิต์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากสาหร่าย และการค้นหาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพชนิดใหม่ได้อีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโปรไฟล์และความสัมพันธ์ของเมแทบอลิต์ที่สกัดได้จากส่วนของลิโปฟิลิก (lipophilic) ของสาหร่ายทะเลชนิดที่พบได้มากในประเทศไทย ชนิด *S. polycystum* *C. lentillifera* และ *G. fisheri* และศึกษากระบวนการการสกัดสารเพื่อให้ได้กลุ่มสารสำคัญหลักของสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสกัดสารออกฤทธิ์จากสาหร่ายทะเล

เก็บตัวอย่างสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล *S. polycystum* จากหาดขนอม จังหวัด นครศรีธรรมราช ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2565 สาหร่ายทะเลสีเขียว *C. lentillifera* จากจังหวัด เพชรบุรี ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2565 และสาหร่ายทะเลสีแดง *G. fisheri* จากจังหวัดสงขลา ในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 จำแนกชนิดของสาหร่ายตามคู่มือของ Coppejans *et al.* (2010) Ng *et al.* (2017) Noiraksar and Ajisaka (2009) และ Price (2011) และยืนยันการระบุชนิดโดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บงกช วิชาชูเชิด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำตัวอย่างสาหร่ายทะเลมาล้างน้ำให้สะอาด อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ BINDER , ประเทศเยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง และบดให้ละเอียดเป็นผง สกัดสารออกฤทธิ์จากสาหร่ายทะเลโดยการแช่หมัก (maceration) โดยชั่งตัวอย่างสาหร่ายทะเลแห้ง ชนิดละ 500 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) 3,000-4,000 มิลลิลิตร เติมน้ำมันอล ปริมาตร 1,500 มิลลิลิตร นำไปวางทิ้งไว้ในตู้มืด เป็นเวลา 7-10 วัน จากนั้นกรองตัวอย่างผ่านกระดาษ กรอง Whatman No. 1 นำสารที่สกัดได้มาระเหยแห้งภายใต้ความดันสุญญากาศด้วยเครื่องกลั่น ระเหยสารแบบหมุน (rotary evaporator) (ยี่ห้อ Heidolph รุ่น Hei-VAP, ประเทศเยอรมัน) ที่ความเร็ว 100-120 รอบต่อนาที (rpm) ความดัน 150-200 มิลลิบาร์ (mbar) อุณหภูมิ 45-60 องศาเซลเซียส เติมน้ำมันโรตารีและน้ำกลั่นลงไปในอัตราส่วน 1:1 แล้วเขย่าให้เข้ากันกับตัวอย่าง ตั้งทิ้งไว้ 30-45 นาที สารจะแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และส่วนลิโปฟิลิก (ดัดแปลงวิธี มาจาก (Napiroon *et al.*, 2021) ไขแยกส่วนลิโปฟิลิกและนำไประเหยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มออก จะได้สารสกัดหยาบส่วนลิโปฟิลิก (lipophilic crude extract) (Zhang and Lin, 2008) เก็บรักษา ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปแยกส่วนด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี (column chromatography) ต่อไป

2. การแยกสารด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟี

โหลดตัวอย่างสารสกัดหยาบส่วนลิโปฟิลิก 3 กรัมลงในคอลัมน์ และใช้เทคนิคคอลัมน์ โครมาโทกราฟี ใช้เฟสคงที่ (stationary phase) เป็นซิลิกาเจล 60N ขนาดอนุภาค 40-63 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Cica 50-70 กรัม และเฟสเคลื่อนที่ คือ ตัวทำละลายเฮกเซนต่อเอทิลอะซิเตท ในอัตราส่วน 85-95:15-5 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแยกส่วนของสาร (ดัดแปลงวิธี มาจาก Buathong *et al.*, 2019) และทำการเก็บสารสกัดแบบส่วน (fraction) โดยกำหนดส่วนละ 50 มิลลิลิตร

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

วิเคราะห์ชนิด ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography - mass spectrometry: GC-MS) รุ่น Agilent 122-5532UI ใช้คอลัมน์ DB-5ms Ultra Inert Liner รุ่น Agilent 5190-2293 โดยสภาวะที่ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารด้วย เครื่อง GC-MS คือ อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรตัวอย่างที่ฉีด 10 ไมโครลิตร โดยใช้ เทคนิคหัวฉีดแบบ splitless ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 58 นาที อุณหภูมิ (เริ่มต้น) 100 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิ (hold time) 3 นาที อุณหภูมิ (สุดท้าย) 310 องศาเซลเซียส

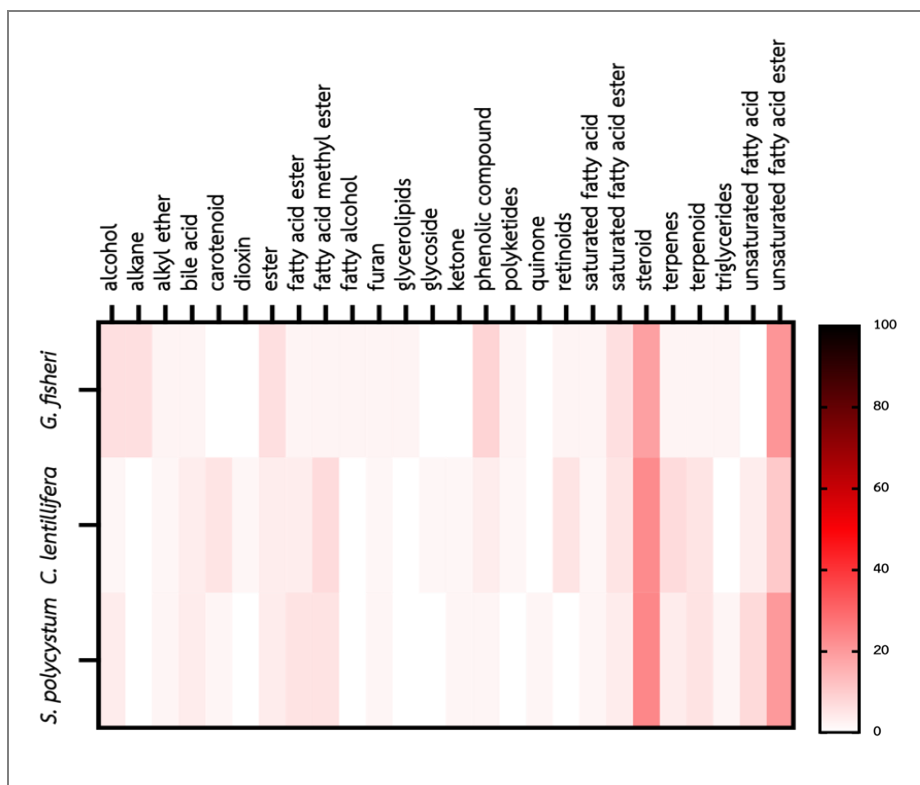
4. การวิเคราะห์ข้อมูลการจัดกลุ่มสารสำคัญ

จัดกลุ่มสารหายทะเลทั้งสามชนิดด้วยข้อมูลสารสำคัญที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิก โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Prism เวอร์ชัน 10 และแสดงผลเป็นแผนที่ความร้อน (heat map) โดยใช้ความเข้มของสีเป็นตัวบ่งชี้ข้อมูล เพื่อช่วยให้เห็นความแตกต่างและคล้ายคลึงขององค์ประกอบของกลุ่มสารเมแทบอลิต์ในสารหายทะเล ร่วมกับการจัดกลุ่มองค์ประกอบของสารเมแทบอลิต์ที่สกัดได้จากสารหายทะเลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป PC-ORD เวอร์ชัน 7.11 (McCune and Mefford, 2016) ข้อมูลที่ใช้ คือ องค์ประกอบของสารเมแทบอลิต์ และแปลงข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้ลอการิทึม (log-transformation) เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากนั้นใช้การจัดกลุ่มแบบสองทาง (two-way cluster analysis) ที่คู่ขนานกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal components analysis: PCA) เพื่อวิเคราะห์ความผันแปรระหว่างตัวอย่าง และจัดกลุ่มองค์ประกอบของสารเมแทบอลิต์ในสารหายทะเลโดยใช้ convex hull polygons

ผลการวิจัย

1. โปรไฟล์ของสารเมแทบอลิต์ในสารหายทะเล

พบสารเมแทบอลิต์ที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิกของสารหายทะเลทั้งสามชนิด รวมทั้งสิ้น 112 สาร ซึ่งสามารถจัดกลุ่มตามสารสำคัญหลัก (major compounds) ออกเป็น 26 กลุ่ม ได้แก่ แอลกอฮอล์ (alcohol) แอลเคน (alkane) อัลคิลอีเทอร์ (alkyl ether) กรดน้ำดี (bile acid) แคโรทีนอยด์ ไดออกซิน (dioxin) เอสเทอร์ (ester) กรดไขมันเอสเทอร์ (fatty acid ester) กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (fatty acid methyl ester) แอลกอฮอล์ไขมัน (fatty alcohol) ฟูแรน (furan) กลีเซอรอลลิพิด (glycerolipids) ไกลโคไซด์ (glycoside) คีโตน (ketone) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) โพลีคีไทด์ (polyketides) ควิโนน (quinone) เรตินอยด์ (retinoids) กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) กรดไขมันอิ่มตัวเอสเทอร์ (saturated fatty acid ester) สเตียรอยด์ (steroid) เทอร์พีน (terpenes) เทอร์พีนอยด์ (terpenoid) ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ (unsaturated fatty acid ester) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกลุ่มสารที่สกัดได้จากสารหายทะเลทั้งสามชนิด พบว่าสารสำคัญเด่นของสารหายทะเล *S. polycystum* และ *C. lentillifera* คือ สเตียรอยด์ โดยมีองค์ประกอบสูงสุด เท่ากับ 24 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รองลงมา ได้แก่ กรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ มีองค์ประกอบเท่ากับ 20 และ 11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งต่างจากสารหายทะเล *G. fisheri* ที่พบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 21 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา ได้แก่ สเตียรอยด์ มีองค์ประกอบเท่ากับ 19 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้สารหายทะเลทั้งสามชนิดยังพบสารในกลุ่มอัลคิลอีเทอร์ ฟูแรน และกรดไขมันอิ่มตัว คิดเป็นสัดส่วน 2 เปอร์เซ็นต์ ขององค์ประกอบที่เท่ากัน ดังภาพที่ 1



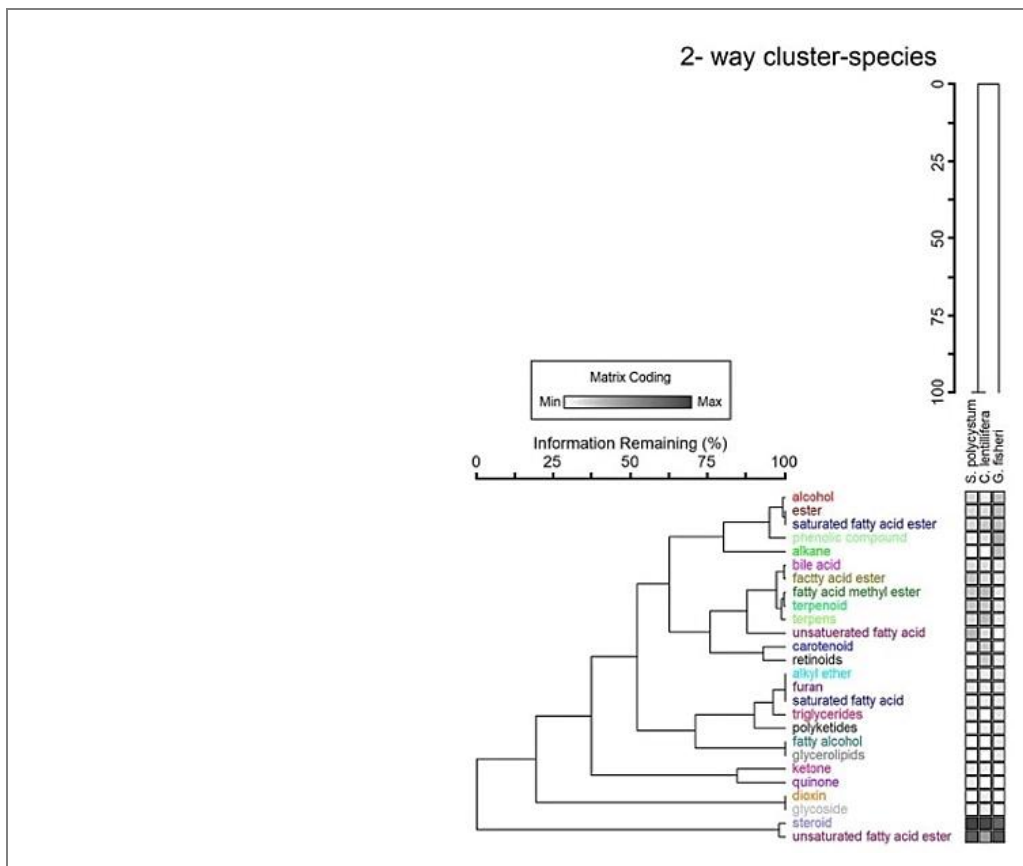
ภาพที่ 1 โปรไฟล์องค์ประกอบของสารเมแทบอไลต์ที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิกของสาหร่ายทะเล *S. polycystum* *C. lentillifera* และ *G. fisheri*

2. ความสัมพันธ์ของกลุ่มสารสำคัญหลักที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด

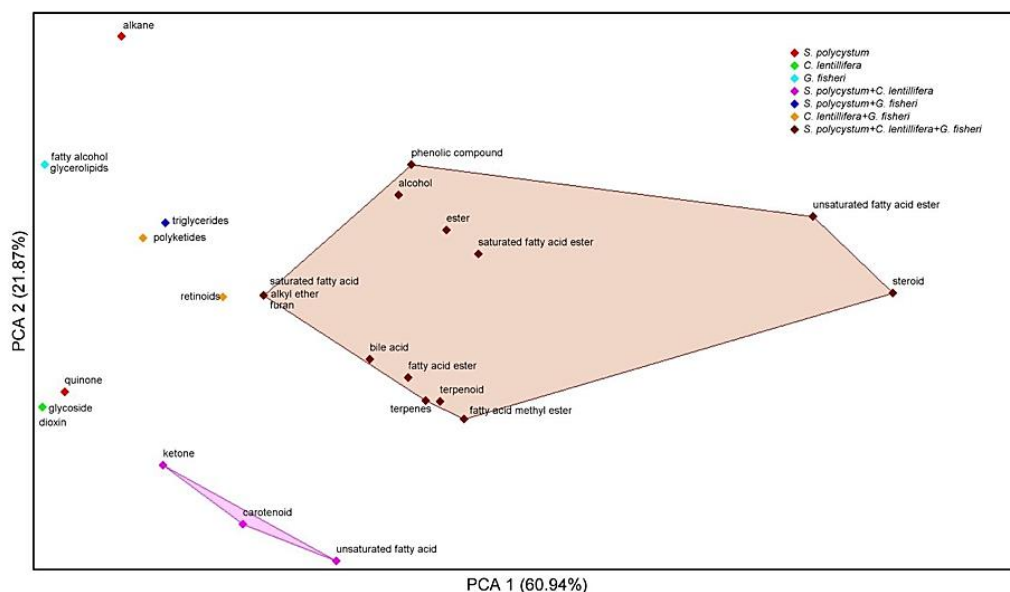
จากการวิเคราะห์การจัดกลุ่มแบบสองทางของกลุ่มสารสำคัญหลักที่เป็นองค์ประกอบของสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด พบว่า *S. polycystum* มีองค์ประกอบของสารสำคัญหลักที่สกัดได้จากส่วนของไลโปฟิลิกคล้ายคลึงกับ *C. lentillifera* มากที่สุดถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และสาหร่ายทะเลทั้งสองชนิดนี้มีองค์ประกอบของสารสำคัญหลักต่างจาก *G. fisheri* (ภาพที่ 2)

จากการจำแนกสารสำคัญจากสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิดด้วย PCA แสดงดังภาพที่ 3 โดยแกนที่ 1 สามารถอธิบายข้อมูลได้ 60.94 เปอร์เซ็นต์ และแกนที่ 2 อธิบายข้อมูลได้ทั้งสิ้น 21.87 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งสิ้นสามารถอธิบายข้อมูลได้ 82.81 เปอร์เซ็นต์ พบว่ากลุ่มสารสำคัญหลักที่พบเป็นองค์ประกอบในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิดมีทั้งสิ้น 14 กลุ่ม ได้แก่ แอลกอฮอล์ อัลคิลอีเทอร์ กรดน้ำดี เอสเทอร์ กรดไขมันเอสเทอร์ กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ ฟูแรน สารประกอบฟีนอลิก กรดไขมันอิมิด์ กรดไขมันอิมิด์เอสเทอร์ สเตียรอยด์ เทอร์พีน เทอร์พีนอยด์ และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ กลุ่มสารสำคัญที่พบเป็นองค์ประกอบใน *S. polycystum* และ *C. lentillifera* มีทั้งสิ้น 3 กลุ่ม ได้แก่ แคโรทีนอยด์ คีโตน และกรดไขมันไม่อิ่มตัว กลุ่มสารสำคัญที่พบได้ทั้งใน *C. lentillifera* และ *G. fisheri* มีทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่ โพลีคีไทด์ และเรตินอยด์ กลุ่มสารสำคัญที่พบเป็นองค์ประกอบใน *S. polycystum* และ *G. fisheri* มีทั้งหมด 1 กลุ่ม ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ และกลุ่มสารสำคัญที่พบเป็น

องค์ประกอบในสาหร่ายทะเลชนิดใดชนิดหนึ่ง ได้แก่ กลุ่มสารสำคัญที่พบได้เฉพาะ *S. polycystum* มี 1 กลุ่ม ได้แก่ ควิโนน และกลุ่มสารสำคัญที่พบได้เฉพาะ *C. lentillifera* มีทั้งหมด 2 กลุ่ม ได้แก่ ไดออกซิน และไกลโคไซด์ ส่วนกลุ่มสารที่สามารถพบได้เฉพาะใน *G. fisheri* มีทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ แอลเคน แอลกอฮอล์ไขมัน และกลีเซอรอลลิพิด ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 เดนโดแกรม (dendrogram) ของการวิเคราะห์การจัดกลุ่มแบบสองทาง กลุ่มสารสำคัญหลักทั้งหมด 26 ตัว ที่พบในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด



ภาพที่ 3 PCA แสดงการจัดกลุ่มของกลุ่มสารสำคัญที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิกจากสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด

3. กระบวนการสกัดสารสำคัญในกลุ่มสเตียรอยด์และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์จากสารสกัดหยาบ

จากการศึกษาพบว่ากลุ่มสารเมแทบอไลต์หลักที่พบในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด คือ สเตียรอยด์และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ ซึ่งมีกระบวนการสกัดดังนี้ นำสารสกัดหยาบส่วนลิโปฟิลิกของสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด ที่ได้จากวิธีแช่หมักด้วยเมทานอล จากนั้นนำมาระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน และนำมาแยกส่วน (partition) ในกรวยแยก โดยใช้ตัวทำละลายน้ำกลั่นกับไดคลอโรมีเทนเป็นอัตราส่วน 1:1 ตั้งทิ้งไว้ 30-45 นาที สารจะแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนไฮโดรฟิลิก และส่วนลิโปฟิลิก ไขแยกส่วนลิโปฟิลิกและนำไประเหยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนออก ได้เป็นสารสกัดหยาบส่วนลิโปฟิลิก นำมาแยกผ่านคอลัมน์โครมาโทกราฟี โดยใช้ อัตราส่วนตัวทำละลาย เฮกเซน : เอทิลอะซิเตท เท่ากับ 85-95 : 15-5 โดยปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) และทำการเก็บสารสกัดส่วนละ 50 มิลลิลิตร จะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์และสเตียรอยด์ในสารสกัดแบบส่วนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4

(Tahir *et al.*, 2018) ส่วนสารกลุ่มสเตียรอยด์สามารถแยกได้จากสารสกัดแบบส่วนที่ 3 ของการสกัดสาหร่ายทะเล *C. lentillifera* และ *G. fisheri* ซึ่งสารกลุ่มสเตียรอยด์นี้มีการรายงานว่าสามารถสกัดได้จาก *U. fasciata* ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Naikwadi *et al.*, 2023) และต้านมะเร็ง (Sundarraj *et al.*, 2012) และจาก *U. expansa* *Rhizoclonium riparium* *Codium isabelae* *C. sertularioides* *Spyridia filamentosa* *G. vermiculophylla* และ *Padina durvillaei* ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง และป้องกันโรคหัวใจ (Zhang *et al.*, 2021) จากฤทธิ์ของสารสำคัญต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากสาหร่ายทะเลมีศักยภาพในการพัฒนาศึกษา และประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหารเสริม และเครื่องสำอางได้ (Bialek *et al.*, 2016; Millman and Ross, 2003; Pulikkottil *et al.*, 2013)

จากข้อมูลกลุ่มสารเมแทบอลิต์ที่มีจำนวนมากทำให้ยากในการสกัดแยกสารแต่ละชนิด การจัดกลุ่มสารสำคัญจะช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการสกัดสารได้ งานวิจัยนี้จึงได้จัดสารเมแทบอลิต์ตามกลุ่มสารสำคัญโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางเคมี (Ullah *et al.*, 2024) และใช้โปรแกรม PC-ORD ในการวิเคราะห์การจัดกลุ่มสาหร่ายตามองค์ประกอบของสารสำคัญ รวมทั้งแสดงการกระจายตัวของกลุ่มสารสำคัญในสาหร่ายด้วยแผนที่ความร้อน (Ito *et al.*, 2014) จากการจัดกลุ่มองค์ประกอบของสารสำคัญในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด พบกลุ่มสารทั้งสิ้น 14 กลุ่มที่เป็นองค์ประกอบในสาหร่ายทะเลทุกชนิด เช่น สารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ที่มีการรายงานพบได้ทั้งในพืช สาหร่าย แมลง และจุลชีพ (ศิริวรรณ และ ประไพรัตน์, 2566) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบและต้านมะเร็ง จึงนิยมนำไปพัฒนาในทางการแพทย์ รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมในน้ำหอมหรือการใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางอีกด้วย (Fan *et al.*, 2023) สารกลุ่มควิโนนเคยมีการรายงานพบใน *S. polycystum* ซึ่งมีฤทธิ์ในการต้านมะเร็ง ต้านเชื้อเอชไอวี (HIV) และต้านแบคทีเรีย สามารถนำไปพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมยา (Ferreira *et al.*, 2021) เป็นต้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกลุ่มสารสำคัญที่สกัดได้จากส่วนลิโปฟิลิกในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด พบว่า *S. polycystum* และ *C. lentillifera* มีองค์ประกอบของสารสำคัญที่คล้ายคลึงกันมากที่สุด และต่างจากสาหร่ายทะเล *G. fisheri* ผลการศึกษาความสัมพันธ์นี้แตกต่างจากการจัดสายวิวัฒนาการของสาหร่ายที่รายงานว่าสาหร่ายสีเขียวมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับสาหร่ายสีแดงมากกว่าสาหร่ายสีน้ำตาล (Chan and Bhattacharya, 2010) ทั้งนี้สารสกัดส่วนลิโปฟิลิกของสาหร่ายสีเขียวและน้ำตาลมีความคล้ายคลึงกันอาจสะท้อนถึงการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ที่จะช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตและความได้เปรียบในการแข่งขันในแหล่งที่อยู่อาศัยทางทะเลที่หลากหลาย (Chhetri *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตามหากจะนำข้อมูลองค์ประกอบของสารสำคัญไปประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับสายวิวัฒนาการควรต้องเพิ่มเติมข้อมูลสารสกัดในส่วนของปฏิกิริยาและในส่วนของไฮโดรฟิลิก ด้วยรวมทั้งเพิ่มจำนวนชนิดของสาหร่ายในแต่ละกลุ่มให้มากขึ้น จะได้เป็นฐานข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการจัดลำดับสายวิวัฒนาการต่อไป

จากองค์ประกอบของสารสำคัญที่พบในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสาหร่ายทะเลในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อสกัดสารสำคัญและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการแยกสารสำคัญในส่วนของลิโปฟิลิกตามที่รายงานไว้ไปประยุกต์ใช้เพื่อสกัดสารสำคัญและนำไปศึกษาพัฒนาและประยุกต์ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

จากการสกัดสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิดโดยเมทานอลและแยกส่วนลิโปฟิลิกไปวิเคราะห์พบสารเมแทบอลิต์ทั้งสิ้น 112 ชนิด และสามารถจัดกลุ่มสารสำคัญได้ทั้งสิ้น 26 กลุ่ม โดยกลุ่มสารสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักในสาหร่ายทะเลทั้งสามชนิด ได้แก่ *S. polycystum* *C. lentillifera* และ *G. fisheri* คือ สเตียรอยด์และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์ โดยสามารถแยกสารกลุ่มกรดไขมันไม่อิ่มตัวเอสเทอร์จากสาหร่ายทะเล *S. polycystum* ได้ในสารสกัดแบบส่วนที่ 2 และสามารถแยกสารกลุ่มสเตียรอยด์จากสาหร่ายทะเล *C. lentillifera* และสาหร่ายทะเล *G. fisheri* ได้ในสารสกัดแบบส่วนที่ 3 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกลุ่มสารสำคัญพบว่า *S. polycystum* และ *C. lentillifera* มีความคล้ายคลึงกันมากที่สุด โดยสารสำคัญที่แยกได้สามารถนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ทูลสนับสนุนงานพื้นฐาน TUFF 06/2567 นอกจากนี้ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เทพปัญญา เจริญรัตน์ สำหรับขั้นตอนการเตรียมชีวมวลสาหร่ายทะเล ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บงกช วิชาชูเชิด สำหรับการระบุชนิดของสาหร่ายทะเล ขอขอบคุณ ดร.สุเมธ คงเกียรติไพบูลย์ และนางสาวงามพัคตร์ ทายะนา ที่ช่วยในการวิเคราะห์สารสำคัญ ขอขอบคุณ นางสาวณิดา แซ่ตั้ง และอาจารย์จิตรา เจริญชัย สำหรับคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลการจัดกลุ่มสารสำคัญในสาหร่ายทะเล และสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ศิริวรรณ ศรีสิทธิ์ และประไพรัตน์ สีสกุล. (2566). เทอร์พีนอยด์ที่แยกได้จากมะดุก. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 28(3), 2087-2100.
- สายัณห์ นันทะนะ สุพรรณชา ชันธโสภา และนริศรา วงศ์สิงห์. (2566). ผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตและการผลิตสารสีแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ของสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorococcum* sp. TISTR 8266. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 120-134.
- Batool, A. and Menaa, F. (2020). Concentration and purification of seaweed components by chromatography methods. In Tiwari, B.K. and Troy, D. (Eds.). *Sustainable seaweed technologies*, pp. 315-370. Amsterdam: Elsevier.
- Bialek, A., Bialek, M., Jelinska, M. and Tokarz, A. (2016). Fatty acid profile of new promising unconventional plant oils for cosmetic use. *International Journal of Cosmetic Science*, 38(4), 382-388, doi: <https://doi.org/10.1111/ics.12301>.

- Buathong, R., Schindler, F., Schinnerl, J., Valant-Vetschera, K., Bacher, M., Potthast, A., Rosenau, T. and Vajrodaya, S. (2019). Uncommon fatty acids, iridoids and other secondary metabolites from the medicinal plant species *Ixora cibdela* Craib (Rubiaceae). *Phytochemistry Letters*, 33, 77-80, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2019.07.011>.
- Chan, C.X. and Bhattacharya, D. (2010). The origin of plastids. *Nature Education*, 3(9), 84.
- Chhetri, B.K., Mojib, N., Moore, S.G., Delgadillo, D.A., Burch, J.E., Barrett, N.H., Gaul, D.A., Marquez, L., Soapi, K., Nelson, H.M., Quave, C.L. and Kubanek, J. (2023). Cryptic chemical variation in a marine red alga as revealed by nontargeted metabolomics. *ACS Omega*, 8(15), 13899-13910, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00301>.
- Coppejans, E., Prathep, A., Leliaert, F., Lewmanomont, K. and De Clerck, O. (2010). *Seaweeds of Mu Ko Tha Lae Thai (SE Thailand): Methodologies and field guide to the dominant species (Vol. 11)*. Bangkok: Biodiversity Research and Training Program.
- Cornish, M.L. and Garbary, D.J. (2010). Antioxidants from macroalgae: Potential applications in human health and nutrition. *Algae*, 25(4), 155-171, doi: <https://doi.org/10.4490/algae.2010.25.4.155>.
- Elbahnaswy, S. and Elshopakey, G.E. (2024). Recent progress in practical applications of a potential carotenoid astaxanthin in aquaculture industry: A review. *Fish Physiology and Biochemistry*, 50(1), 97-126, doi: <https://doi.org/10.1007/s10695-022-01167-0>.
- Fan, M., Yuan, S., Li, L., Zheng, J., Zhao, D., Wang, C., Wang, H., Liu, X. and Liu, J. (2023). Application of terpenoid compounds in food and pharmaceutical products. *Fermentation*, 9(2), 119, doi: <https://doi.org/10.3390/fermentation9020119>.
- Farage, M.A., Miller, K.W., Elsner, P. and Maibach, H.I. (2007). Structural characteristics of the aging skin: A review. *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 26(4), 343-357, doi: <https://doi.org/10.1080/15569520701622951>.
- Ferreira, V.F., de Carvalho, A.S., Ferreira, P.G., Lima, C.G.S. and da Silva, F.C. (2021). Quinone-based drugs: An important class of molecules in medicinal chemistry. *Medicinal Chemistry*, 17(10), 1073-1085, doi: <https://doi.org/10.2174/1573406416666201106104756>.
- Imokawa, G. (2019). The xanthophyll carotenoid astaxanthin has distinct biological effects to prevent the photoaging of the skin even by its postirradiation treatment. *Photochemistry and Photobiology*, 95(2), 490-500, doi: <https://doi.org/10.1111/php.13039>.

- Ito, K., Sakata, K., Date, Y. and Kikuchi, J. (2014). Integrated analysis of seaweed components during seasonal fluctuation by data mining across heterogeneous chemical measurements with network visualization. *Analytical Chemistry*, 86(2), 1098-1105, doi: <https://doi.org/10.1021/ac402869b>.
- Kumarasinghe, H.S. and Gunathilaka, M.D.T.L. (2024). A systematic review of fucoxanthin as a promising bioactive compound in drug development. *Phytochemistry Letters*, 61, 52-65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2024.03.009>.
- McCune, B. and Mefford, M.J. (2016). *PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data. Version 7*. Retrieved 27 November 2024, from: <https://static1squarespace.com/static/58f588c93e00be17785ced5d/t/5bcccc404785d3d9aac3e266/1540148334020/PBooklet7.pdf>.
- Millman, R.B. and Ross, E.J. (2003). Steroid and nutritional supplement use in professional athletes. *The American Journal on Addictions*, 12(s2), S48-S54, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1521-0391.2003.tb00556.x>.
- Naikwadi, P.H., Phatangare, N.D. and Mane, D.V. (2023). Active anti-inflammatory potency of γ -sitosterol from *Woodfordia floribunda* Salisb. *The Journal of Plant Science Research*, 38(2), 691-700, doi: <https://doi.org/10.32381/JPSR.2022.38.02.23>.
- Napiroon, T., Tanruean, K., Poolprasert, P., Bacher, M., Balslev, H., Poopath, M. and Santimaleeworagun, W. (2021). Cannabinoids from inflorescences fractions of *Trema orientalis* (L.) Blume (Cannabaceae) against human pathogenic bacteria. *PeerJ*, 9, e11446, doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.11446>.
- Nazarudin, M.F., Alias, N.H., Balakrishnan, S., Wan Hasnan, W.N.I., Noor Mazli, N.A.I., Ahmad, M.I., Md Yasin, I.-S., Isha, A. and Aliyu-Paiko, M. (2021). Chemical, nutrient and physicochemical properties of brown seaweed, *Sargassum polycystum* C. Agardh (Phaeophyceae) collected from Port Dickson, Peninsular Malaysia. *Molecules*, 26(17), 5216, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules26175216>.
- Nazarudin, M.F., Isha, A., Mastuki, S.N., Ain, N.M., Mohd Ikhsan, N.F., Abidin, A.Z. and Aliyu-Paiko, M. (2020). Chemical composition and evaluation of the α -glucosidase inhibitory and cytotoxic properties of marine algae *Ulva intestinalis*, *Halimeda macroloba*, and *Sargassum ilicifolium*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2020(1), 2753945, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/2753945>.
- Ng, P.K., Lin, S.M., Lim, P.E., Hurtado, A.Q., Phang, S.M., Yow, Y.Y. and Sun, Z. (2017). Genetic and morphological analyses of *Gracilaria firma* and *G. changii* (Gracilariaceae, Rhodophyta), the commercially important agarophytes in western Pacific. *Plos One*, 12(7), e0182176, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182176>.

- Noiraksar, T. and Ajisaka, T. (2009). Taxonomy and distribution of *Sargassum* (Phaeophyceae) in the Gulf of Thailand. In *Proceedings of the 19th International Seaweed Symposium* (pp. 513-527). Dordrecht: Springer.
- Price, I.R. (2011). A taxonomic revision of the marine green algal genera *Caulerpa* and *Caulerpella* (Chlorophyta, Caulerpacae) in northern (tropical and subtropical) Australia. *Australian Systematic Botany*, 24(3), 137-213, doi: <https://doi.org/10.1071/SB10033>.
- Pulikkottil, B.J., Dauwe, P., Daniali, L. and Rohrich, R.J. (2013). Corticosteroid use in cosmetic plastic surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 132(3), 352e-360e, doi: <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31829acc60>.
- Sayuti, N.H., Muhammad Nawawi, K.N., Goon, J.A., Mokhtar, N.M., Makpol, S. and Tan, J.K. (2023). A review of the effects of fucoxanthin on NAFLD. *Nutrients*, 15(8), 1954, doi: <https://doi.org/10.3390/nu15081954>.
- Sundarraj, S., Thangam, R., Sreevani, V., Kaveri, K., Gunasekaran, P., Achiraman, S. and Kannan, S. (2012). γ -Sitosterol from *Acacia nilotica* L. induces G2/M cell cycle arrest and apoptosis through c-Myc suppression in MCF-7 and A549 cells. *Journal of Ethnopharmacology*, 141(3), 803-809, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.03.014>.
- Tahir, N., Qader, K., Azeez, H. and Rashid, J. (2018). Inhibitory allelopathic effects of *Moringa oleifera* Lamk plant extracts on wheat and *Sinapis arvensis* L. *Allelopathy Journal*, 44, 35-48, doi: <https://doi.org/10.26651/allelo.j./2018-44-1-1152>.
- Tapotubun, A.M., Rieuwpassa, F., Supratman, U. and Setha, B. (2019). Effect of different drying methods on phytochemical content of *Caulerpa lentillifera* from Kei islands. *International Journal of ChemTech Research*, 12(6), 109-115, doi: <https://doi.org/10.20902/IJCTR.2019.120614>.
- Teramukai, K., Kakui, S., Beppu, F., Hosokawa, M. and Miyashita, K. (2020). Effective extraction of carotenoids from brown seaweeds and vegetable leaves with edible oils. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 60, 102302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102302>.
- Torres, P., Santos, J.P., Chow, F. and dos Santos, D.Y.A.C. (2019). A comprehensive review of traditional uses, bioactivity potential, and chemical diversity of the genus *Gracilaria* (Gracilariales, Rhodophyta). *Algal Research*, 37, 288-306, doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.12.009>.

- Ullah, T., Muhammad, Z., Shah, I. A., Bourhia, M., Nafidi, H.-A., Mohammad Salamatullah, A. and Ali Younous, Y. (2024). Multivariate analysis of the summer herbaceous vegetation and environmental factors of the sub-tropical region. *Scientific Reports*, 14(1), 15657, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63780-8>.
- Wu, Y., Gao, H., Wang, Y., Peng, Z., Guo, Z., Ma, Y., Zhang, R., Zhang, M., Wu, Q. and Xiao, J. (2022). Effects of different extraction methods on contents, profiles, and antioxidant abilities of free and bound phenolics of *Sargassum polycystum* from the South China Sea. *Journal of Food Science*, 87(3), 968-981, doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16051>.
- Yin, S., Niu, L., Shibata, M., Liu, Y. and Hagiwara, T. (2022). Optimization of fucoxanthin extraction obtained from natural by-products from *Undaria pinnatifida* stem using supercritical CO₂ extraction method. *Frontiers in Nutrition*, 9, 981176, doi: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.981176>.
- Zhang, K., Li, T., Shan, X., Lu, R., Zhang, S. and Xu, H. (2021). Cholesterol: Bioactivities, structural modification, mechanisms of action, and structure-activity relationships. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 21(14), 1830-1848, doi: <https://doi.org/10.2174/1389557521666210105123320>.
- Zhang, L.-L. and Lin, Y.-M. (2008). Tannins from *Canarium album* with potent antioxidant activity. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 9(5), 407-415, doi: <https://doi.org/10.1631/jzus.B0820002>.

การประเมินความหลากหลาย ปริมาณสารอาหาร และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ ผักพื้นบ้านในเมนูขนมจีนเมืองนครศรีธรรมราช ประเทศไทย

Assessment of Species Diversity, Nutritional Content, and Antioxidant Activity of Indigenous Vegetables in the Rice Noodles with Fish Curry Sauce Dish from Nakhon Si Thammarat, Thailand

นฤมล มีบุญ¹ เยาวมาลย์ เขียวสอาด² สมพร เรืองอ่อน^{3,5}

สมรักษ์ รอดเจริญ⁴ และสิริลักษณ์ สิ้นธุพาชี^{3,5*}

Naruemon Meeboon¹, Yaowamarn Keawsaard², Somporn Ruang-On^{3,5},

Somrak Rodjaroen⁴ and Siriluk Sintupachee^{3,5*}

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความหลากหลายของชนิดพืช ปริมาณสารอาหาร และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผักพื้นบ้าน 25 ชนิด ที่ใช้ในเมนูขนมจีนแกงป่าในจังหวัดนครศรีธรรมราช ประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในด้านพลังงาน โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้า (*ash content*) โดยใบของหมารูย (*Clausena cambodiana*) มีปริมาณพลังงานสูงที่สุด (448.53 ± 34.44 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม) ในขณะที่ใบของกระสัง (*Peperomia pellucida*) มีค่าต่ำที่สุด (288.77 ± 0.02 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม) เมล็ดสะตอ (*Parkia speciosa*) มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (28.61 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม) ในขณะที่ผลของข่าป่า (*Alpinia malaccensis*) มีค่าต่ำที่สุด (7.43 ± 0.04 กรัมต่อ 100 กรัม) ปริมาณไขมันสูงที่สุดในเมล็ด

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

¹ Program in Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

² สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² Program in Agriculture, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

³ สาขาวิชานวัตกรรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

³ Program in Creative Innovation in Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

⁴ สาขาวิชานวัตกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

⁴ Program in Agriculture Innovation, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

⁵ หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านแมลงและสมุนไพร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

⁵ Specialized Research Unit on Insects and Herbs, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

* Corresponding author e-mail: siriluk_sint@nstru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.264856>

Received: 29 September 2024, Revised: 2 February 2025, Accepted: 11 February 2025

สะตอ (17.18 ± 0.07 กรัมต่อ 100 กรัม) ขณะที่เปลือกไม่มีไขมัน (0.00 ± 0.00 กรัมต่อ 100 กรัม) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดในผลของมะไฟ (*Baccaurea ramiflora*) (82.05 ± 0.12 กรัมต่อ 100 กรัม) และต่ำที่สุดในใบของกระสัง (48.85 ± 0.08 กรัมต่อ 100 กรัม) ใบของกระสังยังมีปริมาณเถ้าสูงที่สุด (23.84 ± 0.01 กรัมต่อ 100 กรัม) อีกด้วย ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี ORAC FRAP และ DPPH มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนขึ้นอยู่กับส่วนของพืช เช่น ใบของท่มมั่ง (*Litsea petiolate*) และยอดอ่อนของมะม่วงหิมพานต์ (*Anacardium occidentale*) แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณฟลาโวนอยด์และสารฟีนอลิกที่สูง ใบของมะกอก (*Spondias pinnata*) และหนุ่ยก็มีค่าการทดสอบ ORAC และ FRAP สูงเช่นกัน ผลไม้ เช่น ลูกชิ่ง (*Ficus botryocarpa*) และมะไฟ แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับปานกลาง ขณะที่เมล็ดสะตอมีค่าต่ำกว่า อย่างไรก็ตามเปลือกของสะตอมีฤทธิ์สูงกว่าเมล็ด โดยเฉพาะในการทดสอบด้วยวิธี FRAP และ DPPH ดอกไม้ ซึ่งในที่นี้ คือ ตัวอย่างของดาหลา (*Etlingera elatior*) พบว่ามีระดับสารอาหารและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระค่อนข้างต่ำ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าใบและยอดอ่อนมีคุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าส่วนอื่นของพืช จึงมีความสำคัญในการนำมาเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาอาหารฟังก์ชันและการประยุกต์ใช้ด้านโภชนาการ

คำสำคัญ: ขนมหิน ภูมิปัญญา ผักพื้นบ้าน ปริมาณสารอาหาร สารต้านอนุมูลอิสระ

Abstract

This study assessed the species diversity, nutritional content, and antioxidant activity of 25 indigenous vegetables used with a traditional dish of rice noodles with fish curry sauce from Nakhon Si Thammarat, Thailand. Significant differences ($p < 0.05$) were found in energy, protein, fat, carbohydrate, and ash contents. *Clausena cambodiana* leaves had the highest energy content (448.53 ± 34.44 kcal/100 g), while *Peperomia pellucida* leaves had the lowest (288.77 ± 0.02 kcal/100 g). *Parkia speciosa* seeds exhibited the highest protein content (28.61 ± 0.05 g/100 g), while *Alpinia malaccensis* fruits had the lowest (7.43 ± 0.04 g/100 g). Fat content was highest in *P. speciosa* seeds (17.18 ± 0.07 g/100 g) and undetectable in its peel (0.00 ± 0.00 g/100 g). Carbohydrates content was highest in *Baccaurea ramiflora* fruits (82.05 ± 0.12 g/100 g) and lowest in *P. pellucida* leaves (48.85 ± 0.08 g/100 g). *P. pellucida* leaves also showed the highest ash content (23.84 ± 0.01 g/100 g). Antioxidant capacity, analyzed by ORAC, FRAP, and DPPH assays, showed distinct variations depending on the plant part. Leaves and young shoots, such as those from *Litsea petiolata* and *Anacardium occidentale*, demonstrated the highest antioxidant capacity, which correlated with their high flavonoid and phenolic compound content. *Spondias pinnata* and *Clausena cambodiana* leaves also showed high ORAC and FRAP values. Fruits, including *Ficus botryocarpa* and *Baccaurea ramiflora*, had moderate antioxidant activity, while *P. speciosa* seeds displayed lower values. The

peel of *P. speciosa* performed better than its seed, particularly in the FRAP and DPPH assays. Flowers, represented by *Etlingera elatior*, exhibited relatively low antioxidant and nutrient levels. These findings highlight the superior nutritional and antioxidant properties of leaves and young shoots, emphasizing their importance for functional food and dietary applications.

Keywords: Fish curry sauce dish, Traditional knowledge, Vegetable, Nutrition content, Antioxidant

Introduction

The incorporation of fresh vegetables with spicy foods in Southeast Asian cuisine can be attributed to multifaceted factors, including culinary, cultural, and climatic considerations (Putra *et al.*, 2023). The culinary rationale behind this practice is to achieving a sensorially balanced meal, in which the milder and often cooling attributes of fresh vegetables counteract the robust flavors inherent in spicy dishes (Fieldhouse, 2002). This combination provides a textural contrast, enhancing the overall gustatory experience, but also imparts a refreshing effect, particularly salient in the context of the warm and humid climate prevalent in the region. Furthermore, the nutritional enrichment afforded by the vitamins, minerals, and fiber present in fresh vegetables contributes to a comprehensive and balanced dietary profile (Pem and Jeewon, 2015). The prevalence of locally available, diverse, and tropical vegetables further underscores the practicality and sustainability of this culinary tradition. Rooted in historical culinary practices, the integration of fresh herbs and vegetables into Southeast Asian cuisines serves as a cultural cornerstone. This tradition is perpetuated through successive generations, shaping the gastronomic identity of the region (Zocchi *et al.*, 2024). Moreover, the incorporation of flavorful dipping sauces and condiments, often featuring fresh herbs, citrus, and vegetables, is emblematic of the meticulous attention to taste and presentation in Southeast Asian culinary traditions. In a broader context, the utilization of fresh vegetables with spicy foods not only conforms to traditional practices but also aligns with a holistic approach to culinary aesthetics, nutritional value, and local agricultural abundance (Varzakas and Antoniadou, 2024). This is particularly evident in Nakhon Si Thammarat in southern of Thailand, where culturally ingrained culinary practices consistently incorporate vegetables into daily dietary habits. This cultural phenomenon reflects an intricate interplay among nutritional habits, agricultural practices, and regional cultural norms. The practice of including vegetables in every meal is a cultural hallmark, symbolizing a profound connection with the land and its agricultural heritage (Thomas *et al.*, 2022). The ubiquity of vegetables aligns with the region's robust agricultural

practices, contributing to a distinctive cultural identity tied to agrarian traditions. The integration of vegetables into daily culinary practices acts as a conduit for the transmission of cultural values across generations, evident in familial and communal settings where meals become cultural rituals (Kennedy *et al.*, 2021).

The preparation of rice noodles in fish curry sauce, a traditional Thai dish in Nakhon Si Thammarat, consistently incorporates locally sourced vegetables, emphasizing the importance of indigenous produce in maintaining the authenticity of the culinary tradition (Chamnian *et al.*, 2024). This culinary practice aligns with the region's agricultural richness, where locally grown vegetables contribute not only to the dish's flavor profile but also to its cultural and historical roots (Cole *et al.*, 2023). The use of these local vegetables underscores a sustainable and regionally distinct approach to culinary creation, ensuring that rice noodles in fish curry sauce remains a true reflection of Nakhon Si Thammarat's unique gastronomic identity (Chamnian *et al.*, 2024). The rice noodles in fish curry sauce dish embodies profound cultural significance, serving as a culinary representation of the region's rich heritage and traditions. Beyond its role in daily cuisine, the dish holds cultural importance in social gatherings and ceremonial occasions, fostering community and contributing to the festive cultural fabric. Its use of locally sourced ingredients, diverse toppings, and harmonious flavor profiles reflect both the agricultural abundance of the region and the culinary creativity ingrained in local practices (Aster *et al.*, 2023).

This study aimed to systematically assess the species diversity, nutritional composition, and antioxidant properties of indigenous vegetables commonly consumed with rice noodles in fish curry sauce in Nakhon Si Thammarat, Thailand. The research focuses on identifying and categorizing the plant species used in this traditional dish, analyzing their nutritional value, and evaluating their antioxidant potential. By highlighting the significance of these vegetables in local dietary habits, the study seeks to provide scientific insights into their health benefits and culinary importance. The findings will contribute to promoting the use of indigenous vegetables, supporting sustainable dietary practices, and preserving cultural food traditions in the region.

Research Methods

1. Sample collection sites

Plant samples were collected from residue-free gardens associated with a group of 11 entrepreneurs in Nakhon Si Thammarat Province, who are involved in rice noodle and fish curry sauce businesses. The entrepreneurs, with operational experience ranging from 3 to 25 years, operate under three business models: sole proprietorship, family business, and community business.

2. The plant collection and taxonomic identification

The procedure involves a sequential series of steps commencing with detailed observations of plant features, including leaves, flowers, stems, and reproductive structures. The following stages include collecting plant specimens, thoroughly documenting their characteristics, using botanical keys for identification, and conducting a comparative analysis with herbarium specimens or databases (Bailey, 1963). Expert confirmation from the Forest Herbarium, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation in Bangkok, Thailand, is sought for accurate identification, particularly for complex plant groups or when uncertainties arise.

3. Plant sample preparation

For macronutrient analysis, plant samples were dried at 50 °C in an incubator for 48 hours and subsequently ground into a powder before analysis according to the next step. For antioxidant analysis, the dried samples (prepared following the same procedure) were extracted using methanol in a ratio of 1:10 (weight: volume) and refluxed using the T100 (BUCHI) apparatus at 70 °C for 2 hours. The resulting solution was transferred into a new extraction tube and evaporated to dryness at 70 °C for 10 minutes. The extract was then redissolved in 2 mL of phosphate buffer and centrifuged at 10,000 rpm for 5 minutes. The supernatant was subsequently transferred into a new 2-mL microtube. For phytochemical screening using thin-layer chromatography (TLC), The extract was reconstituted with 2 mL of methanol in a 2-mL microtube and centrifuged at 10,000 rpm for 5 minutes to remove debris.

4. Nutritional analysis

The Kjeldahl method for protein determination involves three key steps (Jung *et al.*, 2003). In step 1: Mineralization, the sample was weighed and combined with a catalyst tablet, antifoam tablet, and sulfuric acid before being heated in stages (150 °C, 250 °C, and 350 °C, respectively) over 5 hours to digest the organic matter. After cooling, water was added to the mineralized sample. Step 2: Distillation involves checking water and sodium hydroxide levels before distilling the mineralized solution for 8 minutes into an Erlenmeyer flask containing HCl, methyl red, and water. Step 3: Determination consists of titrating the unreacted HCl with sodium hydroxide to calculate the nitrogen content, from which the protein percentage was deduced. A control sample was also prepared under the same conditions to ensure accuracy.

For total fat, the procedure begins by accurately weighing 5 g of the sample into a thimble or flask and was dried in an oven at 102 °C for 5 hours. After drying, the thimble was placed in a Soxhlet liquid/solid extractor and approximately 90 mL of petroleum ether was added. The extraction unit is assembled over an electric heating mantle or water bath, and the solvent was heated until it boils, adjusting the heat source so that the solvent drips into the sample chamber at a rate of about 6 drops

per second. The extraction process was continued for 6 hours. After extraction, the unit was removed from the heat source, and the extractor and condenser are detached. The flask was returned to the heat source to evaporate the solvent in an oven at 60 to 80 °C and dried until a constant weight, which typically takes 1 to 2 hours. The flask was cooled in a desiccator and weighed with the contents. To calculate the fat percentage, the following formula was used Equation (1).

$$\text{Crude fat (\%)} = (W2 - W1) \times 100 / S \quad (1)$$

where W1 is the weight of the empty flask, W2 is the weight of the flask with the extracted fat, and S is the weight of the sample.

The protocol for carbohydrate content analysis in McLoughlin *et al.* (2023) involved defatting samples with over 10% fat, followed by incubation with pancreatic α -amylase and amyloglucosidase at pH 6.0 and 37 °C for 4 hours to simulate small intestine conditions, hydrolyzing digestible starch to glucose and maltose. After centrifugation, the supernatant is incubated with enzymes like sucrase, maltase, β -galactosidase, and oligo-1,6- α -glucosidase to hydrolyze sucrose, maltose, lactose, and isomaltose into glucose and fructose, 2-molecules of glucose and galactose, respectively. These monosaccharides were quantified using spectrophotometry based on NADPH formation at 340 nm, and their concentrations were summed to determine the total available carbohydrates in the sample (McLoughlin *et al.*, 2023).

5. Phytochemical profile screening

Two microliters of the extract were spotted onto the 10 cm width x 20 cm length TLC plate using the LINOMAT5 (CAMAG) by VisionCATs program (ver.13.0) to control the position and spotting. The plate was set up for 15 samples with the starting point from the rim is 0.8 mm and solvent front set to 80 mm. The spotted plate was then developed in CAMAG ADC2 Automatic Developing Chamber containing the mobile phase as toluene, acetonitrile, and acetate in a ratio of 35:5:15 (Sintupachee *et al.*, 2022). The developed plate was then documentation under 254 nm, 366 nm, and white light (the wavelength of was 400 - 700 nm). The plate then screened for the group of flavonoid and phenol by derivatization with NP-PEG reagent and Aluminium chloride reagent, respectively, and documentation under 366 nm.

6. Antioxidant activity

Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC) measurement was conducted according to the procedure described by Ou *et al.* (2001). Briefly, the assay was performed in a Costar®96-well black opaque plate (Corning Costar). Each well contained 150 μ L of 10 mM Fluorescein Sodium solution (Sigma-Aldrich). For the standard curve, 25 μ L of various dilutions (200 μ M - 12.5 μ M) of 6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox®) (Sigma-Aldrich) were added. For samples, 25 μ L of sample

dilutions prepared in phosphate buffer (10 mM, pH 7.4) were added. For the blank, 25 μL of phosphate buffer (10 mM, pH 7.4) was used. Each reaction mixture was homogenized, and fluorescence readings were immediately taken using a fluorescent microplate reader at 37°C, with an excitation wavelength of 480 nm and an emission wavelength of 520 nm. The wells were read at intervals of 1 to 5 minutes for a total duration of 60 minutes. The antioxidant capacity relating to Trolox is calculated according to the following Equation (2)

$$\text{Antioxidant capacity} = \frac{\text{AUC}_{\text{sample}} - \text{AUC}_{\text{blank}}}{\text{AUC}_{\text{std.}} - \text{AUC}_{\text{blank}}} \quad (2)$$

Where AUC is Area Under the Curve.

L (+)- Ascorbic acid, epicatechin gallate, [2,2'-azobis(2-methylpropionamidine) dihydrochloride (AAPH)] were obtained from Sigma-Aldrich. Different dilutions of Trolox[®] (200 μM - 12.5 μM) and sample compounds (ascorbic acid and epicatechin gallate, two known antioxidants) in 96-well microplate. In every working well the following was pipetted in triplicate. Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) was done based on Benzie and Strain (1996) method. Briefly, the mixture of the reaction was added 190 μL of reaction mix into well containing the standard, positive control, and sample. Measure the absorbance immediately at 594 nm (A_{594}) at the kinetic mode for 60 min at 37°C.

The 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay was conducted according to the method described by Gulcin and Alwasel, (2023). Briefly, each well of a 96-well microplate contained 200 μL of reaction mixture composed of 20 μL of sample (in 10 mM phosphate buffer, pH 7.4) or blank (using methanol), 0.1 M Tris-HCl buffer (pH 7.4), and 100 μL of DPPH solution (0.2 mM DPPH in 99.5% methanol). The inhibition ratio was calculated using Equation (3)

$$\text{Inhibitor ratio (\%)} = \frac{A_{594_{\text{control}}} - A_{594_{\text{sample}}}}{A_{594_{\text{control}}}} \times 100 \quad (3)$$

Where A_{594} means for absorbance at 594 nm

A regression curve of the form $y = ax + b$ was used to estimate the IC_{50} value, where $\text{IC}_{50} = (50 - b) / a$. Subsequently, the Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC) was determined in $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1} = \text{IC}_{50} \text{ of Trolox} / \text{IC}_{50} \text{ of sample}$.

7. Statistical analysis

All analyses were conducted in triplicate. One-way ANOVA was performed to compare nutrient and antioxidant levels among different vegetable components, followed by Tukey's post-hoc test for significant differences ($p < 0.05$) using IBM[®] SPSS[®] software. Multiple regression analysis was employed to identify the key vegetable contributors to nutrient and antioxidant profiles.

8. Ethics

The research initiatives, endorsed by the Human Research ethics Committee Certificate COA No. REC073/65 from Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, demonstrated adherence to universally accepted human research ethical norms.

Results

1. Plant diversity

A diverse collection of plants highlights the broad distribution of edible species across various families, genera, and plant parts used in the rice noodle with fish curry sauce dish. This diversity reflects both the ecological range and the functional roles these plants serve in local diets and traditions. Twenty-nine species of plants from 14 families were identified (Table 1). The plants used in the dish primarily come from leaves and young shoots (15 species), young leaves (8 species), seeds (3 species), fruits (2 species), and flowers (1 species). Plant taxonomy identification is a scientific process that categorizes and names plants based on morphological and genetic attributes, essential for understanding the diversity and usage of these species. Some of the plants presented in the rice noodle with fish curry sauce dish are rare and highly valued, making them standout items in local markets, but availability may be limited for future analysis.

The Table lists plants from various families, along with their scientific names, common names in Thai or English, and the plant parts used. Species from families such as Anacardiaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, and Zingiberaceae are commonly used, including plants like *Anacardium occidentale* (cashew nut tree) and *Spondias pinnata* (Jew's plum) for their leaves and shoots. The Zingiberaceae family is represented by plants like *Alpinia malaccensis* and *Zingiber zerumbet*, known for their young fruits and aerial parts, contributing aromatic and medicinal qualities. Additionally, Apiaceae plants, such as *Oenanthe javanica* (water celery) and *Centella asiatica* (Asiatic pennywort), provide their aerial parts for the dish.

Due to the limited availability of certain plant species, which are rare and typically collected by villagers from the mountains for sale (and cannot be cultivated locally), only 25 out of the 29 plant species were selected for comprehensive nutritional analysis. The remaining four species did not have enough material for a thorough nutritional evaluation. However, all 29 species were included in the phytochemical analysis using thin-layer chromatography (TLC). Despite the smaller sample sizes for some species, TLC proved effective due to its low material requirements, allowing for the detection and identification of phytochemicals in all samples. This method enabled a broad chemical analysis while accommodating the constraints on sample quantity.

2. Nutrition

The macronutrient content, including protein, carbohydrate, fat, and ash, in 25 vegetable samples was statistically analyzed using one way ANOVA. Significant differences were found at p -value < 0.05 . For protein content, the analysis showed $D_F = 24$, $F(24,25) = 1.740$, $p < 0.001$; for carbohydrate content, $D_F = 24$, $F(24,25) = 3.093$, $p < 0.001$; for total fat content, $D_F = 24$, $F(24,25) = 12.100$, $p < 0.001$; and for ash content, $D_F = 24$, $F(24,25) = 20.710$, $p < 0.001$. The energy content also showed a significant difference, with $D_F = 24$, $F(24,25) = 2.542$, $p < 0.0121$.

The nutrient analysis of 25 plant species demonstrated distinct trends in energy, protein, fat, carbohydrate, and ash contents. Energy content was highest in CCa (448.53 ± 34.44 kcal/100 g) and lowest in PP (288.77 ± 0.02 kcal/100 g), with most species exhibiting energy values around 350 to 370 kcal/100 g. Protein content peaked in PSseed (28.61 ± 0.05 g/100 g) and was lowest in AM (7.43 ± 0.04 g/100 g), with a general trend of higher protein levels in seeds and lower in aerial parts. Fat content varied widely, with PSseed having the highest fat content (17.18 ± 0.07 g/100 g), while PSpeel had undetectable fat levels (0.00 ± 0.00 g/100 g); most species exhibited low fat levels below 2.5 g/100 g. Carbohydrate levels were highest in BR (82.05 ± 0.12 g/100 g) and lowest in PP (48.85 ± 0.08 g/100 g), with a trend toward higher values in fruit and peel-based samples. Ash content was most abundant in PP (23.84 ± 0.01 g/100 g) and least in PSpeel (3.93 ± 0.01 g/100 g), indicating a broad variation linked to plant part type and nutrient density (Table 2).

The nutrient composition from Table 2 shows clear correlations with the parts of the plants analyzed. Leaves and young shoots, which were the most frequently assessed plant parts (including species such as GL, LP, and SP), typically exhibited moderate to high protein contents, with energy values ranging from 322.32 to 368.28 kcal/100 g dry weight. These parts generally had low fat levels, often below 2 g/100 g, which aligns with their natural role as foliage with limited lipid reserves. In contrast, seeds such as those from PS demonstrated higher fat content, notably 17.18 ± 0.07 g/100 g, as seeds tend to store oils for germination. Additionally, carbohydrate content was notably higher in fruit-derived samples like BR (82.05 ± 0.12 g/100 g), reflecting the energy-rich nature of fruit tissues. Flowers, as represented by EE, had balanced but lower nutrient profiles due to their reproductive function. The ash content was highest in young leaves, particularly PP (23.84 ± 0.01 g/100 g), suggesting a higher mineral concentration in these plant tissues. These correlations indicate that the plant parts analyzed exhibit characteristic nutrient profiles, aligning with their biological functions and typical metabolic compositions.

Table 1 Plant species and their part uses

No.	Plant Family	Scientific Name	Common Name Thai/ English	Part of Plant
1	Euphorbiaceae	<i>Glochidion littorale</i> Blume Baill: GL	มันปู/ Mon-Pu	Leaves young shoots
2	Lauraceae	<i>Litsea petiolata</i> Hook. f.: LP	ทิมม้ง/ Litsea	Leaves young shoots
3	Anacardiaceae	<i>A. occidentale</i> L.: AO	มะม่วงหิมพานต์/ Cashew nut tree	Leaves young shoots
4	Moraceae	<i>Ficus botryocarpa</i> Miq.: FB	ลูกช้าง/ Duea ching	Fruits
5	Asteraceae	<i>Crassocephalum crepidioides</i> (Benth.) S.Moore: CC	ผักแกด/ Thickhead weed, Redflower rag leaf, Fireweed	Leaves
6	Anacardiaceae	<i>S. pinnata</i> (L.f.) Kurz.: SP	มะกอก/ Jew's plum	Leaves young shoots
7	Rutaceae	<i>C. cambodiana</i> Guill.: CCa	หมรุย	Leaves
8	Euphorbiaceae	<i>B. ramiflora</i> Lour.: BR	มะไฟ/ Burmese grape	Young fruits
9	Apiaceae	<i>O. javanica</i> (Blume) DC.: OJ	ซีล่อม/ Water celery	Young leaves
10	Amaranthaceae	<i>Alternanthera sissoo</i> hort.: AS	ผักเบ็ดญี่ปุ่น/ Brazilian spinach	Young leaves
11	Asteraceae	<i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC. ex Wight: ES	ผักกาดนกเขา/ Phak nok khao	Young leaves
12	Stilaginaceae	<i>Antidesma velutinsum</i> Blume.: AV	มะเฒ่า	Leaves
13	Asteraceae	<i>Eupatorium capillifolium</i> (Lam.) Small ex Porter & Britton: EC	โกศจุฬา/ Dogfennel	Young leaves
14	Apiaceae	<i>C. asiatica</i> Urban.: CA	บัวบก/ Asiatic pennywort	Young leaves
15	Gnetaceae	<i>Gnetum gnemon</i> Linn. var. tenerum Markgr.: GG	เหลียง เหลียง	Leaves young shoots
16	Alismataceae	<i>Limnocharis flava</i> (L.) Buchenau: LF	ผักพายใหญ่/ Yellow velvetleaf	Young leaves
17	Zingiberaceae	<i>A. malaccensis</i> (Burm.) Roscoe: AM	ข่าป่า/ Arrow root	Young fruits
18	Rutaceae	<i>Feroniella lucida</i> (Scheff.) Swingle: FL	มะสัง/ Wood apple	Leaves seeds
19	Zingiberaceae	<i>Z. zerumbet</i> (Linn.) Smith. ZZ	ทื่อ/ Wild ginger	Young leaves
20	Leguminosae	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lamk.) de Wit.: LL	กระถิน/ White popinac	Leaves seeds

Table 1 (continued)

No.	Plant Family	Scientific Name	Common Name Thai/ English	Part of Plant
21	Zingiberaceae	<i>Etlingera elatior</i> [Jack] R. M. Smith.: EE	ดาหลา/ Torch ginger	Flower
22	Scrophulariaceae	<i>Limnophila rugosa</i> (Roth) Merr.: LR	ราน้ำ/ Phak kachom	Young leaves
23	Leguminosae	<i>Archidendron jiringa</i> Nielsen: AJ	เนียง/ Jering	Fruits
24	Rutaceae	<i>Toddalia asiatica</i> (L.) Lam.: TA	เล็บรอก/ Forest pepper	Leave
25	Mimosoideae	<i>P. speciosa</i> Hassk.: PS	สะตอ/ Nitta tree	Seed
26	Fabaceae	<i>Parkia timoriana</i> (DC.) Merr.: PT	เหรียง/ Tree bean	Seed
27	Zingiberaceae	<i>Alpinia mutica</i> Roxb.: AMm	ปุด/ Orchid ginger	Young leaves
28	Piperaceae	<i>P. pellucida</i> (L.) Humb; Bonpl & Kunth.: PP	กระสัง/ Phak kra sang	Young leaves
29	Anacardiaceae	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi: ST	มะตูมแขก/ Brazilian peppertree	Leaves

Table 2 Nutrient composition of 25 plant species used in rice noodles with fish curry sauce (per 100 g dry weight)

Vegetable species	Energy (kcal/100 g dry weight)	Protein (N x 6.25) (g/100 g dry weight)	Fat (g/100 g dry weight)	Carbohydrate (g/100 g dry weight)	Ash (g/100 g dry weight)
GL	356.37±0.14	15.85±0.41	0.59±0.01	71.90±0.53	5.51±0.01
LP	357.75±0.09	15.05±0.40	2.27±0.08*	69.27±0.59	4.34±0.11
AO	368.28±0.55	25.06±0.21**	1.56±0.05	63.48±0.18	4.48±0.01
FB	352.96±0.14	10.15±0.03	1.74±0.01	74.16±0.05*	8.57±0.07
CC	328.19±0.73	22.73±0.35	1.83±0.00	55.19±0.53	14.76±0.16*
SP	364.92±0.41*	12.48±0.37	1.24±0.02	75.95±0.32*	4.99±0.06
CCa	448.53±34.44**	16.10±0.01	0.64±0.01	70.98±0.20	6.99±0.03
BR	367.18±0.38	7.88±0.01	0.82±0.01	82.05±0.12**	5.54±0.01
OJ	346.69±0.14	15.31±0.11	2.11±0.06	66.62±0.20	12.44±0.04
AS	323.85±0.24	22.86±0.19*	1.47±0.04	54.79±0.23	17.37±0.05
ES	331.33±0.73	16.34±0.05	1.65±0.06	62.77±0.11	13.34±0.03
AV	350.06±0.07	16.19±0.08	0.92±0.01	69.24±0.12	6.44±0.02
AM	352.14±0.99	7.43±0.04	1.34±0.04	77.58±0.13	6.78±0.00
CA	340.68±0.16	15.18±0.06	1.02±0.03	67.69±0.17	11.61±0.03
GG	363.01±0.75	23.58±0.04*	2.06±0.05	62.52±0.04	5.75±0.02
LF	332.46±0.26	21.74±0.23	2.31±0.08**	56.19±0.01	14.35±0.03*
EC	342.64±0.46	21.74±0.16	2.46±0.04**	58.38±0.18	10.51±0.02
EE	322.32±0.04	24.54±0.32**	0.46±0.01	55.00±0.30	13.64±0.03
PP	288.77±0.02	21.06±0.01	1.01±0.03	48.85±0.08	23.84±0.01**
FL	350.20±0.55	17.74±0.22	1.10±0.02	67.32±0.13	7.83±0.02
ST	356.37±0.14	14.58±0.03	1.57±0.06	72.22±0.02	5.95±0.04
PSseed	357.75±0.09	28.61±0.05**	17.18±0.07	44.27±0.17	4.56±0.01
PSpeel	368.28±0.55*	8.17±0.25	0.00±0.00	81.17±0.37**	3.93±0.01
ZZ	352.96±0.14	12.12±0.01	0.55±0.25	76.86±0.05*	4.47±0.01
AMm	328.19±0.73	11.32±0.04	6.73±0.08	64.77±0.04	11.05±0.01

Note: - Values are expressed as mean ± standard deviation.

- Statistically significant differences were determined by Tukey's multiple comparison test (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$).

3. Phytochemical screening using the thin layer chromatography

A TLC plate where different phytochemicals are separated across the lanes. Each lane (numbered 1 to 28 according to the Figure 1) corresponds to different plant

extracts or samples. The bands represent various compounds separated based on their interaction with the TLC solvent system. The darker or more pronounced bands indicate a higher concentration of specific compounds. The intensity and distribution of bands vary across the samples, suggesting significant differences in the composition of phytochemicals. The movement of the bands up the plate reflects the relative polarity of the compounds, with less polar compounds migrating higher up the plate. The banding patterns show a range of compounds, indicating a diversity of chemical constituents in the different plant extracts. Figure 1 (a), the TLC plate has been visualized under specific conditions (likely after spraying with a reagent or under UV light) to highlight phenolic and flavonoid compounds. These compounds often fluoresce or change color when visualized under UV or treated with specific chemicals. These colors represent the reaction of phenolic or flavonoid groups, which are characteristic of many plant metabolites involved in antioxidant activity. Some lanes show prominent yellow or orange bands, particularly in lanes SP, OJ, AS, EC, and PSseed. This indicates that these plant extracts have high concentrations of flavonoids or phenolic compounds. Other lanes, such as LP, CC, and CA, show fainter yellow or orange bands, suggesting a lower concentration of these compounds. Flavonoid-rich extracts: Based on the lower panel, samples in lanes CCa, AS, AM, EE, and PSpeel show distinct yellow-orange fluorescence, indicating they may be particularly rich in flavonoids. The distribution of phenolic compounds varies widely, with some extracts showing strong signals and others having minimal or no detectable phenolics. This variation highlights the chemical diversity across the different samples. The clear differentiation of bands across lanes suggests the presence of unique phytochemical profiles among the samples, particularly in lanes with stronger fluorescence or more distinct patterns. This TLC phytochemical analysis shows considerable variation in the phenolic and flavonoid content across the different samples. The presence of yellow or orange bands in the lower panel indicates that several of the extracts contain significant levels of flavonoids and phenolic compounds, which may correlate with their antioxidant or medicinal properties. Samples in lanes with strong bands are particularly rich in these compounds, while others show lower or negligible amounts.

4. Antioxidant activity

The antioxidant analysis using ORAC and FRAP revealed that all 25 types of vegetables showed significantly different values according to the one way ANOVA test (p -value < 0.05). For ORAC, $F(23, 24) = 7,560, p < 0.001$, and for FRAP, $F(23, 24) = 762.3, p < 0.001$. Similarly, the DPPH test showed $F(23, 24) = 1,809, p < 0.001$.

The Table 3 presents the antioxidant capacity of various samples measured using three different assays: ORAC, FRAP, and DPPH, expressed in micromoles of Trolox

equivalents ($\mu\text{moles TE}$). Among the samples, LP (2,226,877.70 $\mu\text{moles TE}$) and AO (2,029,005.34 $\mu\text{moles TE}$) exhibit the highest ORAC values, indicating their superior oxygen radical absorbance capacity. In the FRAP assay, AO (127,025.02 $\mu\text{moles TE}$) and PSpeel (119,129.44 $\mu\text{moles TE}$) show the highest ferric reducing power. The DPPH assay, which measures free radical scavenging activity, highlights AO (202,077.54 $\mu\text{moles TE}$) and ST (172,049.59 $\mu\text{moles TE}$) as the most effective samples. Conversely, GG (2,696.88 $\mu\text{moles TE}$) and PSseed (1,738.24 $\mu\text{moles TE}$) exhibit the lowest DPPH values, suggesting weak radical scavenging abilities. Samples like AS and PSseed show consistently low values across all assays, whereas ST and PSpeel perform strongly in multiple tests. The variability in results across different methods underscores the complexity of antioxidant activity, with some samples excelling in one assay but not others. These findings highlight significant differences in antioxidant properties among the tested samples, which could be valuable for nutritional and pharmaceutical applications.

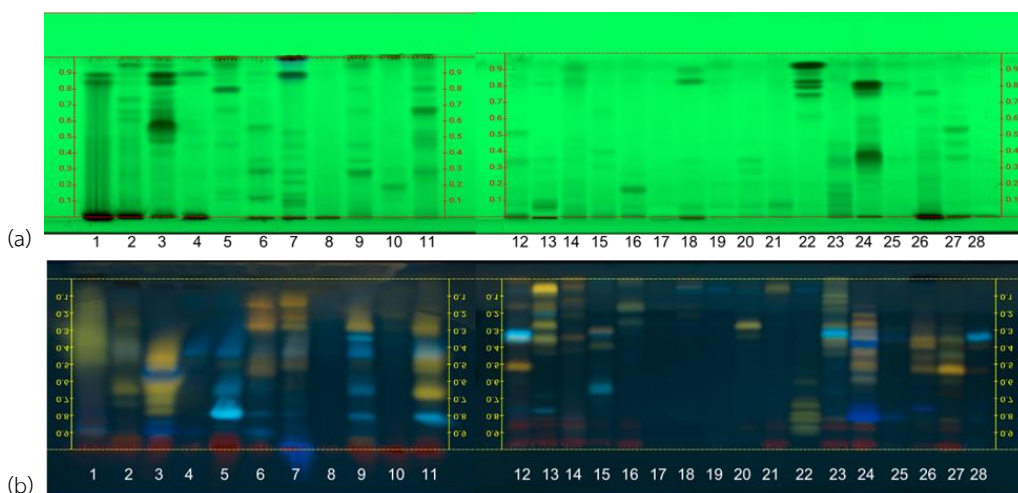


Figure 1 Phytochemical profile on TLC plate under 254 nm UV luminescent (a) and the chemical reaction show the antioxidant activity visualized under 366 nm (b). lane 1: GL, lane 2: LP, lane 3: AO, lane 4: FB, lane 5: CC, lane 6: SP, lane 7: CCa, lane 8: BR, lane 9: OJ, lane 10: AS, lane 11: ES, lane 12: AV, lane 13: AM, lane 14: CA, lane 15: GG, lane 16: LF, lane 17: EC, lane 18: EE, lane 19: PP, lane 20: FL, lane 21: ST, lane 22: PSseed, lane 23: PSpeel, lane 24: LR, lane 25: LL, lane 26: TA, lane 27: ZZ, lane 28: Amm

Table 3 Antioxidant capacity of 25 plant species measured using ORAC, FRAP, and DPPH assays ($\mu\text{moles TE}$)

Vegetable species	ORAC ($\mu\text{moles TE}$)	FRAP ($\mu\text{moles TE}$)	DPPH ($\mu\text{moles TE}$)
GL	90,152.94 $\pm$ 273.67	87,007.63 $\pm$ 118.08*	23,195.47 $\pm$ 371.26
LP	2,226,877.70 $\pm$ 24,050.39**	81,082.32 $\pm$ 2,259.33	153,529.96 $\pm$ 3,042.65*
AO	2,029,005.34 $\pm$ 35,663.08**	127,025.02 $\pm$ 129.43	202,077.54 $\pm$ 5,136.78**
FB	100,204.73 $\pm$ 2,307.55	76,690.27 $\pm$ 1,024.83	91,447.21 $\pm$ 1,266.15
CC	80,922.04 $\pm$ 380.76	17,135.65 $\pm$ 454.68	11,028.01 $\pm$ 88.44
SP	95,239.86 $\pm$ 1,531.88	37,084.13 $\pm$ 1,210.98	25,126.12 $\pm$ 556.80
CCa	148,870.65 $\pm$ 6,472.70	88,007.36 $\pm$ 2,229.80*	80,146.35 $\pm$ 375.23
BR	80,663.77 $\pm$ 3,357.15	14,842.84 $\pm$ 94.57	12,165.81 $\pm$ 291.24
OJ	125,748.09 $\pm$ 1,434.46	20,017.48 $\pm$ 256.06	20,951.36 $\pm$ 280.73
AS	76,588.35 $\pm$ 2,669.91	2,790.93 $\pm$ 52.86	4,586.95 $\pm$ 113.63
ES	114,769.01 $\pm$ 3,584.66	27,546.12 $\pm$ 1,383.86	12,668.62 $\pm$ 53.61
AV	175,301.73 $\pm$ 6,265.86*	76,613.04 $\pm$ 1,426.61	45,841.06 $\pm$ 1,084.11
AM	41,343.16 $\pm$ 276.13	21,006.61 $\pm$ 321.39	18,549.35 $\pm$ 124.20
CA	38,049.40 $\pm$ 199.74	11,898.98 $\pm$ 43.69	8,135.53 $\pm$ 136.05
GG	25,880.96 $\pm$ 1,069.26	4,766.22 $\pm$ 149.50	2,696.88 $\pm$ 37.89
LF	27,926.87 $\pm$ 223.27	7,275.84 $\pm$ 320.74	3,705.74 $\pm$ 56.08
EC	34,040.82 $\pm$ 1,572.67	9,662.06 $\pm$ 159.19	3,978.11 $\pm$ 78.55
EE	23,874.13 $\pm$ 1,096.92	6,748.32 $\pm$ 354.21	4,322.02 $\pm$ 79.18
PP	32,127.30 $\pm$ 972.50	7,479.89 $\pm$ 227.86	3,475.13 $\pm$ 61.91
FL	173,554.74 $\pm$ 10,051.06*	15,175.10 $\pm$ 425.35	7,791.63 $\pm$ 67.51
ST	128,574.43 $\pm$ 4,012.84	114,892.53 $\pm$ 6,347.96**	172,049.59 $\pm$ 2,346.93*
PSseed	10,422.38 $\pm$ 542.50	2,420.52 $\pm$ 70.93	1,738.24 $\pm$ 52.48
PSpeel	95,870.00 $\pm$ 5,037.50	119,129.44 $\pm$ 6,520.55**	135,391.63 $\pm$ 7,357.64*
ZZ	125,766.19 $\pm$ 1,532.68	30,614.09 $\pm$ 1,397.57	24,463.93 $\pm$ 390.80
AMm	131,580.93 $\pm$ 2,702.06	25,519.87 $\pm$ 1,429.60	6,609.44 $\pm$ 141.46

Note: - Values are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

- Statistically significant differences were determined by Tukey's multiple comparison test (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$).

The antioxidant activity of different plant parts was analyzed using ORAC, FRAP, and DPPH assays, highlighting variations among leaves, young shoots, fruits, seeds, and flowers. Among the leaves and young shoots, LP and AO exhibited the highest ORAC values, suggesting strong radical absorption capacities. Cashew Nut Tree (AO) also showed the highest DPPH value, indicating potent free radical scavenging ability. The SP and CCa leaves also demonstrated high antioxidant capacity, particularly in ORAC and FRAP assays. Fruits, such as FB and BR, exhibited moderate antioxidant activity, while

seeds of PS and PT showed lower values across all assays, indicating weaker antioxidant properties. The peel of PS peel performed significantly better than its seed, especially in FRAP and DPPH assays. *A. malaccensis* (AM) and *A. mutica* (AMm), both from the Zingiberaceae family, displayed moderate antioxidant potential, with AMm having higher ORAC and FRAP values compared to AM. The flower of EE showed relatively low antioxidant capacity compared to other plant parts, suggesting that leaves and young shoots generally contain higher antioxidant compounds. Overall, the results indicate that plant parts such as leaves and young shoots possess the highest antioxidant activity, whereas seeds and flowers exhibit relatively lower potential. This suggests that the choice of plant part plays a crucial role in determining antioxidant benefits for nutritional or pharmaceutical applications.

Discussion

The findings of this study highlight the significant variations in antioxidant activity among different plant species, emphasizing the influence of plant parts on antioxidant potential. The results align with previous studies demonstrating that leaves and young shoots generally exhibit higher antioxidant capacities compared to seeds, fruits, and flowers (Fieldhouse, 2002; Kennedy *et al.*, 2021; Yakoh, 2023; Zocchi *et al.*, 2024). The high ORAC and DPPH values observed in *L. petiolata* (LP) and *A. occidentale* (AO) can be attributed to their high flavonoid and phenolic compound content, as confirmed by thin-layer chromatography (TLC) analysis. These results are consistent with findings from previous research indicating that polyphenols and flavonoids contribute significantly to antioxidant activity (Sintupachee *et al.*, 2022).

The variation in antioxidant potential among plant parts suggests a metabolic adaptation in different plant structures. Leaves, being primary photosynthetic organs, accumulate high levels of antioxidants to counteract oxidative stress caused by environmental factors such as UV radiation and pathogens (Thomas *et al.*, 2022). In contrast, seeds and fruits tend to have lower antioxidant activity, as they are primarily storage organs with different metabolic functions. This observation is supported by the relatively low antioxidant values seen in *P. speciosa* (PSseed) and *F. lucida* (FL), which were among the lowest in all three assays (ORAC, FRAP, and DPPH).

The strong antioxidant performance of *P. speciosa* peel (PS peel) over its seed further corroborates the role of plant parts in determining antioxidant potential. The outer layers of fruits and seeds are often rich in phenolic compounds, which act as protective barriers against environmental stressors (Cole *et al.*, 2023; Szerlauth *et al.*, 2019). This is reflected in the significantly higher FRAP and DPPH values of PS peel compared to PS seed. These findings suggest that plant by-products such as peels could be valuable sources of natural antioxidants for functional food applications.

In comparison to other studies focusing on indigenous vegetables, our results align with research on Southeast Asian plants, which frequently demonstrate high antioxidant potential due to their diverse phytochemical composition (Varzakas and Antoniadou, 2024; Putra *et al.*, 2023). The traditional consumption of these plants in Thai cuisine, particularly in dishes like rice noodles with fish curry sauce, not only enhances flavor profiles but also contributes to health benefits by providing dietary antioxidants (Fieldhouse, 2002).

The results of this study also have implications for dietary recommendations and functional food development. The high antioxidant values observed in LP, AO, and AV suggest that these plants could be incorporated into functional foods or nutraceutical products. Further studies should focus on isolating the specific bioactive compounds responsible for the high antioxidant activity in these plants and evaluating their bioavailability and health benefits in human studies.

Overall, this study underscores the importance of plant selection and part utilization in maximizing antioxidant intake. The results support the notion that incorporating a diversity of plant parts, particularly leaves and young shoots, into the diet can significantly enhance antioxidant consumption. Future research should explore the commercial potential of these plants in the food and pharmaceutical industries and their role in mitigating oxidative stress-related diseases.

Conclusion

This study assessed the diversity, nutritional content, and antioxidant activity of indigenous vegetables commonly used in Thai cuisine, particularly in rice noodles with fish curry sauce. The findings revealed significant variability in antioxidant capacity among plant species, with leaves and young shoots exhibiting the highest levels of antioxidant activity. *L. petiolata* (LP) and *A. occidentale* (AO) have significant ORAC and DPPH values, indicating their potential as natural antioxidants and strengthening their position in functional food applications. The concept for this study came from a profound love for traditional Thai culinary traditions, in which locally obtained veggies are vital components of many recipes. By scientifically confirming the antioxidant qualities of these plants, this study promotes the preservation and promotion of Thai culinary traditions with a health focus. Incorporating antioxidant-rich vegetables into traditional cuisines not only maintains cultural history, but it also provides a long-term solution for boosting dietary health. These findings provide valuable insights for the food industry, promoting the use of indigenous Thai vegetables in nutraceutical development and dietary recommendations. Future research should focus on the bioavailability of these antioxidants and their potential role in disease prevention,

further bridging the gap between traditional culinary wisdom and modern nutritional science.

Acknowledgement

The authors acknowledge that this research was funded by the Program Management Unit on Area Based Development (PMU A) under the Office of the National Higher Education, Science, Research and Innovation Policy Council. The research is part of the project set titled “Business Development of Vegetable Products for Khanom Jeen in Mueang Khon: Advancing the Grassroots Economy in Nakhon Si Thammarat Province.” The specific project, “Diversity, Wisdom, and Standardization of Eating Phak Nho in the Phak Nho Khanom Jeen Dish of Mueang Khon, Khao Pa Na Le Area, Nakhon Si Thammarat Province,” is identified by project code 006/2022.

References

- Aster, K.G.V., Castillo, J.R.B., Cheng, S.R., Trillana, J.P.L., Varlez, Y.M.B. and Mercado, J.M.T. (2023). Sawsawan: Explicating the culinary heritage significance of Philippine condiments using bibliometrics (1972-2018). *Journal of Ethnic Foods*, 10, 19, doi: <https://doi.org/10.1186/s42779-023-00186-3>.
- Bailey, L.H. (1963). The standard encyclopedia of horticulture (volume 1, 2, and 3). (2nd ed). New York: The Macmillan Company.
- Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power: The frap assay”. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76, doi: <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>.
- Chamnian, K., Chamnian, M., Mukharak, T., Boonkwan, S. and Nuktreepong, N. (2024). Marketing models and digital marketing communication guidelines for business of rice noodles in fish curry sauce, Nakhon Si Thammarat province. *Journal of Multidisciplinary in Humanities and Social Sciences*, 7(4), 2352-2370.
- Cole, A., Pethan, J. and Evans, J. (2023). The role of agricultural systems in teaching kitchens: An integrative review and thoughts for the future. *Nutrients*, 15(18), 4045, doi: <https://doi.org/10.3390/nu15184045>.
- Fieldhouse, P. (2002). *Food and nutrient custom and culture*. (2nd ed). Canada: Stanley Thomes (Publishers) Ltd.
- Gulcin, İ. and Alwasel, S.H. (2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*, 11(8), 2248, doi: <https://doi.org/10.3390/pr11082248>.
- Jung, S., Rickert, D.A., Deak, N.A., Aldin, E.D., Reckmor, J., Johnson, L.A. and Murphy, P.A. (2003). Comparison of kjeldahl and dumas methods for determining protein contents of soybean products. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 80(12), 1169-1173, doi: <https://doi.org/10.1007/s11746-003-0837-3>.

- Kennedy, G., Kanter, R., Chotiboriboon, S., Covic, N., Delormier, T., Longvah, T., Maundu, P., Omidvar, N., Vish, P. and Kuhnlein, H. (2021). Traditional and indigenous fruits and vegetables for food system transformation. *Current Development in Nutrition*, 5(8), nzab092, doi: <https://doi.org/10.1093/cdn/nzab092>.
- McLoughlin, C., McKie, V.A. and McCleary, B.V. (2023). Validation of the test method-determination of available carbohydrates in cereal and cereal products, dairy products, vegetables, fruit, and related food products and animal feeds: Collaborative study, final action 2020.07, *Journal of AOAC International*, 106(2), 370-383, doi: <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsac116>.
- Ou, B., Hampsch-Woodill, M. and Prior, R.L. (2001). Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4619-4626, doi: <https://doi.org/10.1021/jf010586o>.
- Pem, D. and Jeewon, R. (2015). Fruit and vegetable intake: Benefits and progress of nutrition education interventions-narrative review article. *Iranian Journal of Public Health*, 44(10), 1309-1321.
- Putra, F.K.K., Putra, M.K. and Novianti, S. (2023). Taste of asean: Traditional food images from Southeast Asian countries. *Journal of Ethnic Foods*, 10, 20, doi: <https://doi.org/10.1186/s42779-023-00189-0>.
- Sintupachee, S., Rattanachoo, P. and Promproa, S. (2022). Alpha-mangostin quality and quantity analysis in Nakhon Si Thammarat mangosteen pericarp using thin-layer chromatography. *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture*, 6(1), 51-56, doi: <https://doi.org/10.26480/mjsa.01.2022.51.56>.
- Szerlauth, A., Muráth, S., Viski, S. and Szilagyi, I. (2019). Radical scavenging activity of plant extracts from improved processing. *Heliyon*, 5(11), e02763, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02763>.
- Thomas, A., Alpha, A., Barczak, A. and Zakhia-Rozis, N. (2022). Sustainable food systems for food security, *need for combination of local and global approaches*. Versailles: Quæ Publisher, Inc.
- Varzakas, T. and Antoniadou, M. (2024). A holistic approach for ethics and sustainability in the food chain: The gateway to oral and systemic health. *Foods*, 13(8), 1224, doi: <https://doi.org/10.3390/foods13081224>.
- Yakoh, K. (2023). Antioxidant activity of indigenous vegetables in Suratthani province. *Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, 42(1), 93-103.
- Zocchi, D.M., Sulaiman, N., Prakofjewa, J., Söukand, R. and Pieroni, A. (2024). Local wild food plants and food products in a multi-cultural region: An exploratory study among diverse ethnic groups in Bessarabia, Southern Moldova. *Sustainability*, 16(5), 1968, doi: <https://doi.org/10.3390/su16051968>.

การประเมินสถานะที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์โบรมีเลน จากสับปะรดภูเก็ต

Evaluation of Optimal Conditions for Bromelain Enzyme Activity from *Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Phuket

เชาวนีพร ชีพประสพ* จิรภา คงเขียว และกนิษฐา พงศ์อาทิตย์
Chaowaneeporn Chepprasop*, Jirapa Kongkeaw and Kanitta Phongarhit

บทคัดย่อ

โบรมีเลนเป็นชื่อทั่วไปของเอนไซม์โปรตีโอไลติกที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริลที่บริเวณเร่ง ซึ่งได้จากสับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) ทำหน้าที่ในการย่อยสลายโปรตีน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนเนื้อ แกน และเปลือกของสับปะรดภูเก็ต (*A. comosus* (L.) Merr. cv. Phuket) รวมถึงศึกษาความแตกต่างระหว่างสับปะรดภูเก็ตผลดิบและผลสุก ทำการหากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบโดยวัดปริมาณไทโรซีนที่แสดงออกมาเปรียบเทียบกับไทโรซีนมาตรฐานและแสดงผลในหน่วยยูนิตต่อมิลลิลิตรของเอนไซม์ ผลการทดลองพบว่ากิจกรรมเอนไซม์สูงสุดได้จากส่วนของสับปะรดภูเก็ตผลสุก โดยแสดงค่ากิจกรรมสูงสุดภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลา 10 นาที เมื่อใช้เคซีนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เป็น 5.4 และ 5.7 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ประเมินประสิทธิภาพของสารสกัดเอนไซม์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการขจัดคราบซีอิ๊วบนผ้าฝ้าย พบว่าเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบสามารถขจัดคราบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อแช่ผ้าในสารสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเอนไซม์โบรมีเลนจากส่วนของสับปะรดภูเก็ตมีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซักฟอกและอาจนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เอนไซม์สำหรับการดูแลสิ่งทอในอนาคต

คำสำคัญ: การขจัดคราบ กิจกรรมเอนไซม์ สับปะรดภูเก็ต โบรมีเลน

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

* Corresponding author e-mail: chaowaneeporn.ch@skru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.263342>

Received: 13 May 2024, Revised: 8 February 2025, Accepted: 13 February 2025

Abstract

Bromelain is a general term for proteolytic enzymes containing sulfhydryl groups at the active site, derived from pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.), which function in the hydrolysis of proteins. This study aimed to compare the activities of crude bromelain extracts obtained from the fruit, core, and peel of the *A. comosus* (L.) Merr. cv. Phuket, as well as to investigate the differences between unripe and ripe pineapples. The activity of crude bromelain was determined by measuring the amount of tyrosine released, compared with a tyrosine standard, and expressed in units per milliliter of enzyme. The results revealed that the highest enzyme activity was observed in the extract from the ripe fruit flesh under optimal conditions: pH 4.5, 50 °C and 10 minutes of incubation when using casein as a substrate, which yielded enzyme activity of 5.4 and 5.7 units per milliliter, respectively. Additionally, the efficiency of the crude enzyme extract at pH 4.5 and incubated at 50 °C was evaluated for removing soy sauce stains from cotton fabric. It was found that crude bromelain effectively removed stains, with the highest efficiency observed after soaking the fabric in the enzyme extract for 24 hours. These findings indicate that bromelain from the fruit flesh of *A. comosus* (L.) Merr. cv. Phuket has high potential for application in the detergent industry and could be further developed into enzyme-based textile care products in the future.

Keywords: Stain removal, Enzyme activity, *Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Phuket, Bromelain

บทนำ

สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย โดยมีการผลิตในปริมาณมากและนำเข้าสู่อุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น การแปรรูปผลไม้และการบริโภคผลสด สับปะรดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยวิตามิน น้ำตาล และแร่ธาตุที่จำเป็น (มนตรี, 2559) รวมถึงเป็นแหล่งสำคัญของเอนไซม์โบรมีเลน (bromelain) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม การผลิตแป้ง การผลิตเครื่องสำอาง สิ่งทอ ยา และการแพทย์ (Arshad *et al.*, 2014) เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการย่อยโปรตีน ซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำให้เนื้อนุ่ม การเพิ่มความชื้นของเครื่องดื่ม และการอบคุกกี้ (Walsh, 2014) รวมถึงในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การชักฟอก เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์เสริมอาหารบางชนิด (Hebbbar *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางการแพทย์ เช่น การต้านการอักเสบ การละลายลิ่มเลือด และการฟื้นฟูบาดแผล (Kavitha *et al.*, 2013) รวมทั้งนำมาช่วยในกระบวนการฟอกหนังซึ่งเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการลดการแปรรูปหนังโดยใช้สารเคมี (Sivakumar and Kumar, 2012) สับปะรดภูเก็ต (*A. comosus* (L.) Merr. cv. Phuket) เป็นสายพันธุ์เฉพาะที่ปลูกมากในภาคใต้ของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดภูเก็ตและพังงา มีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากสายพันธุ์อื่น เช่น ผลขนาด

เล็ก ทรงกระบอก เนื้อกรอบ เส้นใยน้อย กลิ่นหอม และรสหวาน (จารุพันธ์, 2526) ลักษณะเฉพาะนี้ ทำให้ได้รับความนิยมในการบริโภค และได้รับการจดทะเบียนเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (geographical indication: GI) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 (ภาวิณี, 2559)

โบรมีเลนเป็นเอนไซม์โปรตีโอไลติก (proteolytic enzyme) ประกอบด้วยกรดอะมิโน 212 ตัว และมีน้ำหนักโมเลกุล 33 กิโลดาลตัน (kDa) (Murachi and Neuratii, 1960) เอนไซม์โบรมีเลนที่พบในสับปะรดโดยส่วนใหญ่มีปริมาณมากในผลและลำต้น ส่วนในใบและแกนกลางพบในปริมาณเล็กน้อย (Hossain *et al.*, 2015) เอนไซม์โบรมีเลนในผลสับปะรดเรียกว่าฟรุ๊ตโบรมีเลน (fruit bromelain: FBM) (EC 3.4.22.33) ส่วนในลำต้นเรียกว่าสเต็มโบรมีเลน (stem bromelain: SBM) (EC 3.4.22.32) (Babu *et al.*, 2008) โดยเอนไซม์นี้ถูกกระตุ้นการทำงานด้วยสารต่าง ๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) ซิสทีอีน (cysteine) โซเดียมไบซัลเฟต (sodium bisulfate) โซเดียมไซยาไนด์ (sodium cyanide) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide) และ เบนโซเอต (benzoate) แต่ถูกยับยั้งการทำงานด้วยไอออนปรอท (II) (Hg^{2+}) ไอออนเงิน (Ag^+) ไอออนทองแดง (II) (Cu^{2+}) อัลฟา-1 แอนติทริปซิน (α -1 antitrypsin) อีสแตติน เอและบี (estatin A and B) ไอโอโดแอซิเตท (iodoacetate) (Dubey *et al.*, 2012) เอนไซม์โบรมีเลนสามารถทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3 ถึง 7 และอุณหภูมิระหว่าง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส (Mohapatra *et al.*, 2013) เช่น การสกัดเอนไซม์โบรมีเลนจากลำต้นสับปะรดพันธุ์ศรีราชา พบกิจกรรมเอนไซม์สูงสุดร้อยละ 80.14 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.0 และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (Sangkhak *et al.*, 2016) หรือเอนไซม์โบรมีเลนจากเปลือกสับปะรดพันธุ์นางแลและภูแล ซึ่งมีกิจกรรมสูงสุด 867 และ 1,032 ยูนิต ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 5.1 ถึง 5.7 (Ketnawa *et al.*, 2011) นอกจากนี้ กิจกรรมเอนไซม์จากผลสับปะรดพันธุ์ศรีราชาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถคงค่ากิจกรรมได้ถึงร้อยละ 83.00 (Jutamongkon and Charoenrein, 2010) อย่างไรก็ตามการทำงานของเอนไซม์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาบ่ม ซึ่งส่งผลต่อกิจกรรมเอนไซม์โดยตรง การศึกษาเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

การศึกษาคุนสมบัติของเอนไซม์โบรมีเลนจากสับปะรดภูเก็ตมีไม่มากนัก โดยเฉพาะในส่วนของกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากแต่ละส่วนของสับปะรดสายพันธุ์นี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากเนื้อ แกน และเปลือกของสับปะรดภูเก็ต ซึ่งวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์โดยใช้โปรตีนเคซีนเป็นสารตั้งต้น (casein digest unit: CDU) และวัดปริมาณไทโรซีนที่แสดงออกมาเปรียบเทียบกับไทโรซีนมาตรฐานในหน่วยยูนิตต่อมิลลิกรัมของเอนไซม์ โดยมุ่งเน้นปัจจัยสำคัญ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาบ่มที่ส่งผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ นอกจากนี้ยังได้ประเมินประสิทธิภาพของเอนไซม์สกัดหยาบในการขจัดคราบสีอู๋บนพื้นผิวผ้าฝ้ายเพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซักฟอกและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเอนไซม์โบรมีเลนสำหรับเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี อุปกรณ์ และวัสดุการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กรดแอซติก (acetic acid) ยี่ห้อ RCI Labscan เคซีน (casein) ยี่ห้อ Fluka แอล-ไทโรซีน (L-tyrosine) ยี่ห้อ Sigma ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (disodium hydrogen phosphate) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (sodium dihydrogen phosphate) ยี่ห้อ Qrec โซเดียมแอซิเตท (sodium acetate) ยี่ห้อ Loba โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) ยี่ห้อ Merck โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ยี่ห้อ RCI Labscan และกรดไตรคลอโรแอซติก (trichloroacetic acid) ยี่ห้อ Merck

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ยี่ห้อ Sigma รุ่น 3-16KL อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ยี่ห้อ Memmert รุ่น WNE10 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2900 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดและด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น S20 SevenEasy

สับปรดในการศึกษา คือ สับปรดภูเก็ต โดยนำผลดิบอายุประมาณ 140 วัน ลักษณะผลมีเปลือกเขียว เนื้อมีสีเหลืองอ่อน และไม่มีกลิ่น ส่วนผลสุกอายุประมาณ 160 วัน ลักษณะผลมีเปลือกสีเหลือง เนื้อมีสีเหลืองเข้ม และมีกลิ่นหอม

2. การสกัดเอนไซม์โบรมีเลนจากส่วนต่าง ๆ ของสับปรดภูเก็ต

นำสับปรดภูเก็ตมาล้างให้สะอาดและปอกเปลือก แบ่งสับปรดภูเก็ตเป็นส่วนต่าง ๆ 3 ส่วน แยกเป็น แกน เปลือก เนื้อ ส่วนละ 200 กรัมของน้ำหนักสด มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นทำการปับแล้วกรองแต่ละส่วนด้วยผ้าขาวบาง นำส่วนสีที่ได้จากการกรองมาเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันและนำไปหมุนเหวี่ยงโดยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะเรียกส่วนสีที่ได้ว่าเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ และจะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจหากิจกรรม (Mohan *et al.*, 2016)

3. การศึกษากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ

3.1 ศึกษากิจกรรมเอนไซม์

โดยวิธีการของ Mohan *et al.* (2016) เติมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีโซเดียมแอซิเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมเคซีนความเข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมกรดไตรคลอโรแอซติกความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร บ่มอีกครั้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 10 นาที โดยทำไปพร้อมกับหลอดควบคุม ซึ่งจะเติมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ 1 มิลลิลิตร หลังจากการหยุดปฏิกิริยาด้วยกรดไตรคลอโรแอซติกความเข้มข้นร้อยละ 5 จากนั้นจึงนำไปหมุนเหวี่ยงโดยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนสีที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร และหาค่ากิจกรรมเอนไซม์เทียบกับกราฟมาตรฐานไทโรซีน

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานไทโรซีน

เตรียมโดยการเติมไทโรซีน 10 มิลลิกรัม ลงในน้ำกลั่น 6 มิลลิลิตร เติมน้ำโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 นอร์มัล (N) ที่ละลายที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนไทโรซีนละลายและปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น โดยสารละลายนี้จะถูกเจือจางต่อไปในความเข้มข้น 10 ถึง 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร และสร้างกราฟมาตรฐานไทโรซีน (Mohan *et al.*, 2016)

3.3 การคำนวณกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลน

โดยใช้สมการของ Mohan *et al.* (2016) ดังสมการ (1)

$$AB = \frac{C \times D}{V \times t} \quad (1)$$

เมื่อ AB แทน กิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลน (ยูนิตต่อมิลลิลิตรเอนไซม์)

C แทน ความเข้มข้นของไทโรซีนเทียบเท่าที่ปล่อยออกมา (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

D แทน ระดับการเจือจาง

V แทน ปริมาตรของเอนไซม์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

T แทน เวลาในการวิเคราะห์ (นาที)

4. การศึกษากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนต่าง ๆ ของสับประรดภูเก็ต

ทำการศึกษาเปรียบเทียบกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนแกน เปลือก และเนื้อของสับประรดภูเก็ตผลติดกับผลสุก โดยวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ด้วยวิธีการของ Mohan *et al.* (2016) ดังข้อ 3 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และเลือกใช้สารสกัดเอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดได้จากส่วนเนื้อของผลการศึกษาไปทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ในลำดับต่อไป

5. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ

5.1 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ

ทำการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ คือ 3.5 4.0 4.5 5.0 7.0 และ 9.0 โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ต่างชนิดกัน ได้แก่ โซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์ (มีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3.5 ถึง 5.0) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0) และโซเดียมคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ (มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9.0) นำเอนไซม์โบรมีเลนไปบ่มร่วมกับบัฟเฟอร์ต่าง ๆ ที่เตรียมไว้โดยใช้เคซีนเป็นสารตั้งต้น และปฏิบัติตามขั้นตอนการศึกษากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ เพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเอนไซม์

5.2 ผลของอุณหภูมิต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ

ทำการประเมินผลของอุณหภูมิต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เคซีนเป็นสารตั้งต้น ภายใต้ความเป็นกรด-ด่าง

ที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งเอนไซม์ถูกบ่มในแต่ละอุณหภูมิเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำตัวอย่างไปวัดค่ากิจกรรม เพื่อกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเอนไซม์

5.3 ผลของระยะเวลาต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบ

ทำการศึกษาผลของระยะเวลาต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลน โดยบ่มสารละลายเอนไซม์ ร่วมกับสารละลายเคซีนที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์ ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ได้แก่ 10 20 30 40 50 60 และ 120 นาที หลังจากบ่มเสร็จในแต่ละช่วงเวลา นำตัวอย่างไปวัดค่ากิจกรรมเอนไซม์โดยเปรียบเทียบกับสารละลายไทโรซีนมาตรฐาน จากนั้นจึงคำนวณค่ากิจกรรมเอนไซม์ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อหาค่าระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเอนไซม์

6. ประสิทธิภาพของเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบต่อการจัดคราบ

นำสารละลายเอนไซม์โบรมีเลนมาปรับสภาวะให้เหมาะสมด้วยโซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 มาทดสอบ ประสิทธิภาพในการจัดคราบซีอิ๊วบนผ้าฝ้าย โดยนำผ้าฝ้ายขนาด 6 x 6 เซนติเมตร แคล้งในปิกเกอร์ ที่มีปริมาณเอนไซม์ปรับสภาวะแล้วปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการเปรียบเทียบกับสารละลาย เอนไซม์ที่ไม่ได้ปรับสภาวะในปริมาตรเดียวกัน ดำเนินการทดลองในช่วงเวลา 6 ถึง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วประเมินผลความสามารถในการจัดคราบที่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างที่ปรับ และไม่ได้ปรับสภาวะ

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

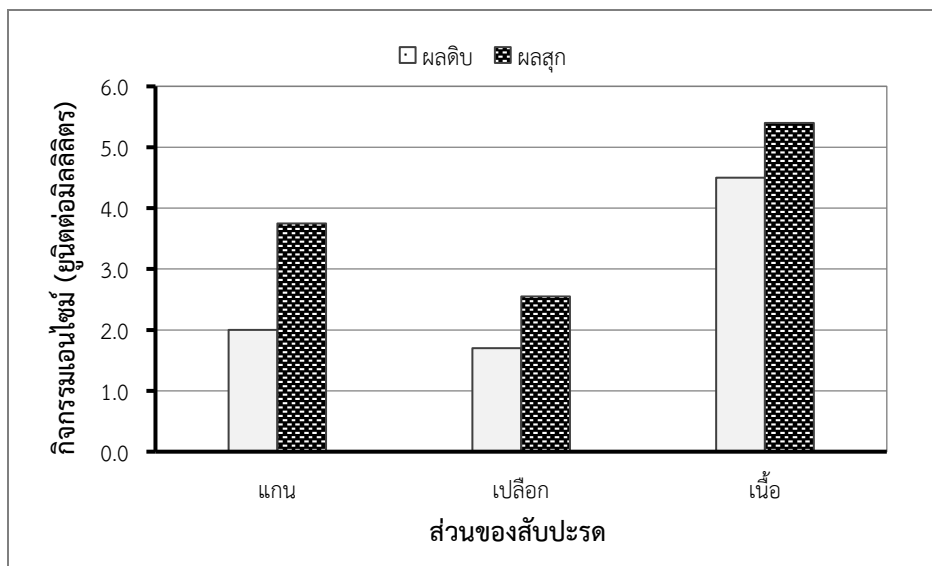
ในการศึกษากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบในครั้งนี้ แต่ละชุดการทดลองทำการ ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง (triplicate) แสดงข้อมูลในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่าง ของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วย โปรแกรมวิเคราะห์สถิติ IBM SPSS เวอร์ชัน 29

ผลการวิจัย

1. กิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนต่าง ๆ ของสับปะรดภูเก็ต

จากการศึกษากิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนแกน เปลือก และเนื้อ ของ สับปะรดภูเก็ตทั้งผลดิบและผลสุก พบว่าสับปะรดภูเก็ตผลดิบให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์เท่ากับ 2.00 ± 0.02 1.70 ± 0.05 และ 4.50 ± 0.07 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ส่วนสับปะรดภูเก็ตผลสุกมีค่า กิจกรรมเอนไซม์เท่ากับ 3.75 ± 0.09 2.55 ± 0.03 และ 5.40 ± 0.04 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ พบระดับ เอนไซม์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลน ในส่วนเนื้อของสับปะรดภูเก็ตผลสุกมีค่าสูงสุด คือ 5.40 ± 0.04 ยูนิตต่อมิลลิลิตร รองลงมา คือ ในส่วน เนื้อของสับปะรดภูเก็ตผลดิบ 4.50 ± 0.07 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1) สอดคล้องกับงานวิจัยของอาภัสสร และกาญจนาพร (2563) ซึ่งทำการศึกษากิจกรรมของสารสกัดหยาบจากสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียส่วนแกน เปลือก เนื้อ ก้าน และเหง้า ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในเวลา 10 นาที พบว่า

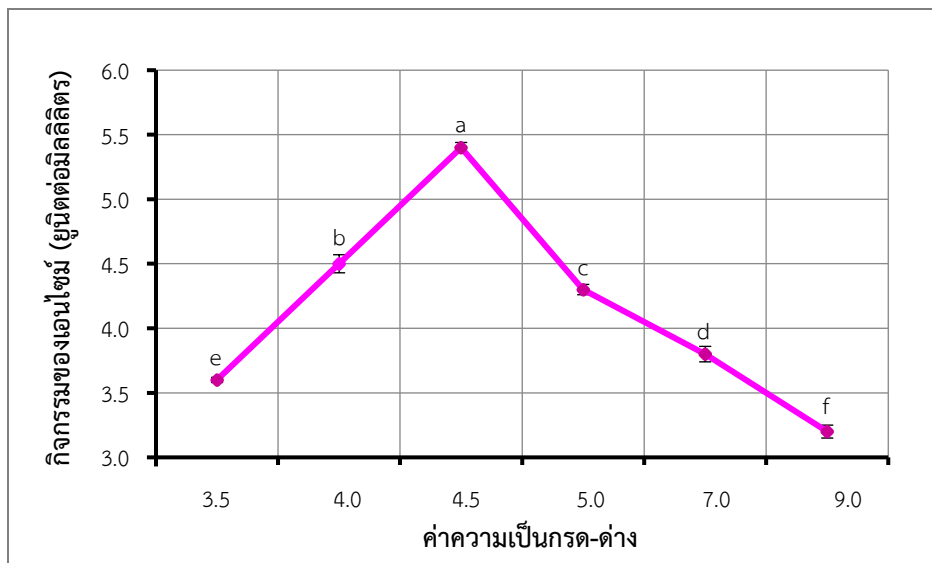
มีเอนไซม์จากส่วนเนื้อมากที่สุด รวมทั้งการศึกษาของ More *et al.* (2019) ทำการสกัดเอนไซม์โบรมิเลนจากส่วนเนื้อและเหง้าของสับปะรด ประเทศอินเดีย เมื่อวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 นาที พบว่าส่วนเนื้อของสับปะรดมีกิจกรรมเอนไซม์สูงกว่าส่วนเหง้า ดังนั้นจึงนำเอนไซม์โบรมิเลนสกัดหยาบที่สกัดได้จากส่วนเนื้อของสับปะรดมาเกิดผลสุกไปใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ในลำดับต่อไป



ภาพที่ 1 กิจกรรมเอนไซม์โบรมิเลนสกัดหยาบจากส่วนแกน เปลือก และเนื้อของสับปะรดที่เกิดผลดิบและผลสุก

2. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมิเลนสกัดหยาบ

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมิเลนสกัดหยาบจากเนื้อสับปะรดที่เกิดผลสุกที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ ได้แก่ 3.5 4.0 4.5 5.0 7.0 และ 9.0 พบว่าแต่ละค่าความเป็นกรด-ด่างมีกิจกรรมเอนไซม์เป็น 3.6 ± 0.02 4.5 ± 0.07 5.4 ± 0.04 4.3 ± 0.04 3.8 ± 0.06 และ 3.2 ± 0.05 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ พบระดับเอนไซม์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 เอนไซม์โบรมิเลนมีค่ากิจกรรมสูงสุด (ภาพที่ 2) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mohan *et al.* (2016) พบว่ากิจกรรมเอนไซม์โบรมิเลนสูงสุดในส่วนเนื้อที่สกัดจากสับปะรด ประเทศอินเดีย โดยมีกิจกรรมเอนไซม์ตั้งแต่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 4 ถึง 5 แต่มีกิจกรรมสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และการศึกษาของ Dubey *et al.* (2012) พบว่าเอนไซม์โบรมิเลนจากส่วนเนื้อของสับปะรด ประเทศอินเดียก็ให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 เช่นกัน



ภาพที่ 2 กิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสักดหยาบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ ตั้งแต่ 3.5 ถึง 9.0 (ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันบนเส้นกราฟ หมายถึง กลุ่มทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))

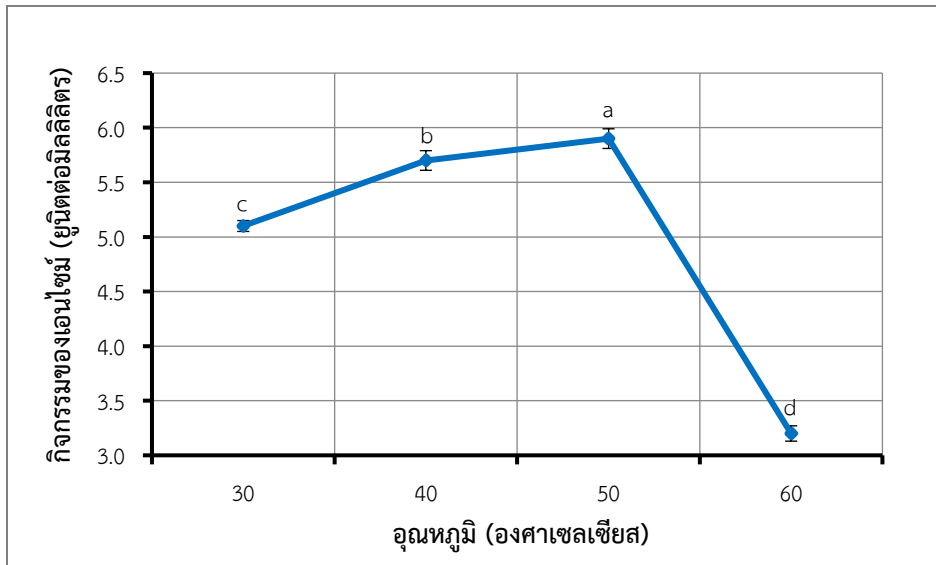
3. ผลของอุณหภูมิต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสักดหยาบ

ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์โบรมีเลนสักดหยาบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ภายใต้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5) พบว่าแต่ละอุณหภูมิเอนไซม์มีค่ากิจกรรมเป็น 5.1 ± 0.05 5.7 ± 0.09 5.9 ± 0.09 และ 3.2 ± 0.07 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ พบระดับเอนไซม์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าเอนไซม์มีค่ากิจกรรมดีที่สุดในที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 3) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Ketnawa *et al.* (2012) Vallés *et al.* (2007) และ Koh *et al.* (2006)

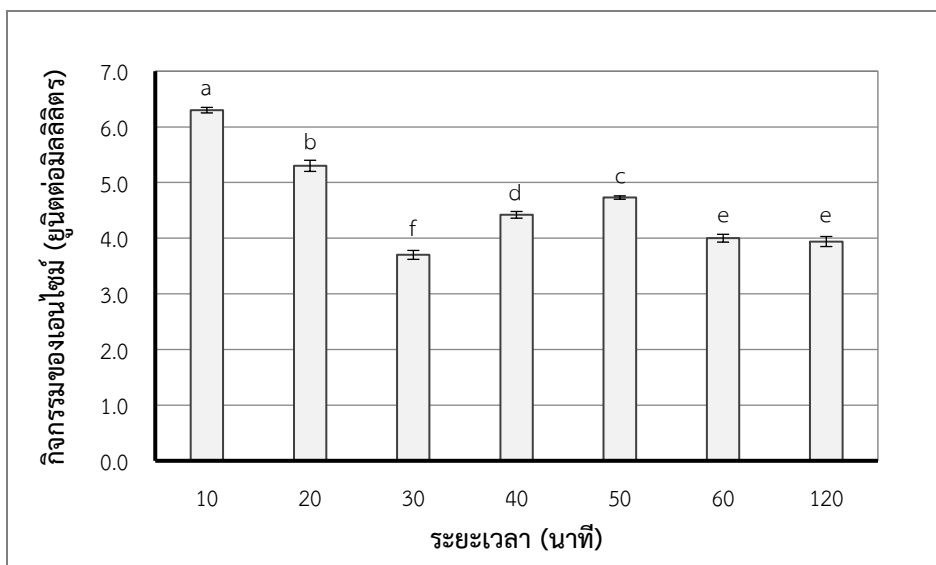
4. ผลของระยะเวลาต่อกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสักดหยาบ

ผลการศึกษาระยะเวลาของการบ่มเอนไซม์ร่วมกับเคซีนต่อกิจกรรมเอนไซม์ในเวลา 10 20 30 40 50 60 และ 120 นาที ภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าที่ระยะเวลาต่าง ๆ เอนไซม์มีค่ากิจกรรมเป็น 6.3 ± 0.05 5.3 ± 0.10 3.7 ± 0.08 4.4 ± 0.06 4.7 ± 0.03 4.0 ± 0.07 และ 3.9 ± 0.09 ยูนิตต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ พบระดับเอนไซม์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลที่ปรากฏพบว่าการบ่มเอนไซม์ในเวลา 10 นาที เอนไซม์จะมีค่ากิจกรรมสูงที่สุด และเอนไซม์มีความสามารถคงกิจกรรมไว้ได้มากกว่าร้อยละ 50 (3.9 ± 0.09 ยูนิตต่อมิลลิลิตร) แม้จะใช้เวลาในการบ่มเป็นเวลา 120 นาที (ภาพที่ 4) แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์โบรมีเลนจากสับปะรดภูเก็ตมีกิจกรรมเอนไซม์ได้เร็วและสามารถคงสภาพกิจกรรมได้ดี เช่นเดียวกับเอนไซม์โบรมีเลนจากผลสับปะรดพันธุ์ศรีราชาที่มีกิจกรรมเอนไซม์ร้อยละ 83 เมื่อทำการบ่มเอนไซม์เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Jutamongkon and Charoenrein,

2010) หรือกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนจากสับปะรดของประเทศมาเลเซียก็สามารถคงกิจกรรมได้ร้อยละ 90 ในเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Poh and Abdul Majid, 2011)



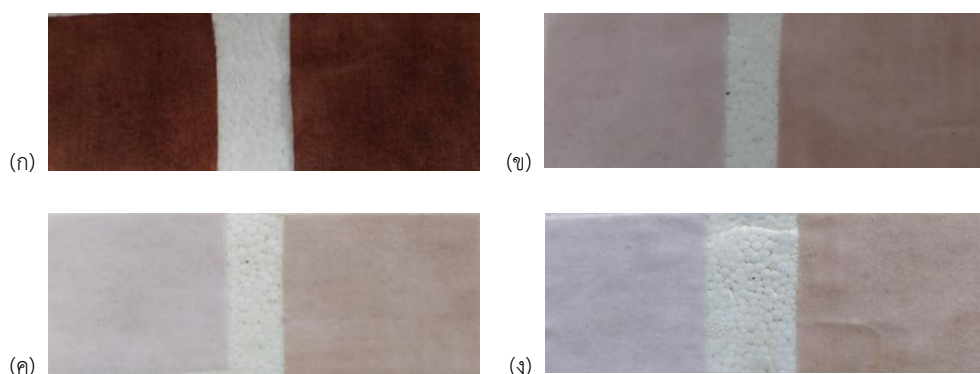
ภาพที่ 3 กิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส (ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันบนเส้นกราฟ หมายถึง กลุ่มทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))



ภาพที่ 4 กิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบเมื่อบ่มที่ระยะเวลาแตกต่างกันตั้งแต่ 10 ถึง 120 นาทีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันบนกราฟรูปแท่ง หมายถึง กลุ่มทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))

5. ประสิทธิภาพของเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบต่อการกำจัดคราบ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบต่อการกำจัดคราบซีอิ๊บนผ้าฝ้าย โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเอนไซม์ที่ทำการปรับสภาวะให้เหมาะสมที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 กับเอนไซม์ที่ไม่ทำการปรับสภาวะ ในช่วงเวลา 6 ถึง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าเอนไซม์ที่ทำการปรับสภาวะสามารถขจัดคราบซีอิ๊วได้ดีกว่าเอนไซม์ที่ไม่ทำการปรับสภาวะในทุกช่วงเวลาของการศึกษา โดยเอนไซม์ที่ทำการปรับสภาวะสามารถขจัดคราบได้ตั้งแต่ 6 ชั่วโมงแรกของการศึกษาและค่อย ๆ ขจัดคราบได้ดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 12 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเอนไซม์สามารถขจัดคราบได้ดีที่สุด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพของเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบต่อการกำจัดคราบในช่วงเวลา 0 (ก) 6 (ข) 12 (ค) และ 24 ชั่วโมง (ง) โดยปรับสภาวะให้เหมาะสมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5 (ซ้าย) และไม่มีการปรับสภาวะ (ขวา)

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการวัดกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดหยาบจากแกน เปลือก และเนื้อ ของสับปะรด ภูเก็ตที่ระยะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน (ผลดิบและผลสุก) พบว่ากิจกรรมเอนไซม์มากที่สุดในส่วนเนื้อของผลสุก เนื่องจากสับปะรดเป็นผลไม้ที่มีเอนไซม์โบรมีเลนปริมาณสูงในระยะสุกแต่ไม่มีโบรมีเลนในระยะผลอ่อน โดยระดับของเอนไซม์โบรมีเลนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและยังคงสูงอยู่จนกระทั่งผลสุก จากนั้นปริมาณจะลดลงเล็กน้อย (Silvestre *et al.*, 2012)

การศึกษาค่าผลของความเป็นกรด-ด่างต่อกิจกรรมเอนไซม์จะทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าไม่ทำให้เอนไซม์เกิดการสูญเสียสภาพมากเกินไป (Bonner, 2007) เอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดจากลำต้นและเนื้อโดยส่วนใหญ่จะมีกิจกรรมเอนไซม์สูงสุดในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0 ถึง 6.8 (Harrach, 1995) เอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดได้จากส่วนของเนื้อของสับปะรดภูเก็ตมีกิจกรรมสูงสุดในสารละลายโซเดียมแอสซิเตทบัฟเฟอร์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 ซึ่งสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่าและสูงกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อกิจกรรมเอนไซม์นี้มีผลให้ค่ากิจกรรมเอนไซม์ลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีผลต่อ

การแตกตัวของหมู่โซ่ข้าง (R-group) ของกรดอะมิโนในโมเลกุลของเอนไซม์ รวมทั้งมีผลทำให้ประจุของหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ของกรดอะมิโนในเอนไซม์เปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อโครงสร้างสามมิติ (tertiary structure) ของเอนไซม์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะบริเวณเร่ง (active site) ทำให้เอนไซม์เกิดการสูญเสียสภาพและความสามารถของเอนไซม์ในการจับกับสารตั้งต้นหรือซับสเตรต (substrate) ที่บริเวณเร่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ (Gu, 2024) จากการทดลองยังพบว่าเอนไซม์โบรมีเลนที่ทำการศึกษานี้มีค่ากิจกรรมเอนไซม์สูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ โดยอุณหภูมิ 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส ทำให้กิจกรรมเอนไซม์สูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลมีพลังงานจลน์มากขึ้นเพื่อรับปฏิกิริยา แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม (optimum temperature) จะทำให้พันธะเปปไทด์และพันธะไดซัลไฟด์ถูกทำลาย ดังนั้นจึงทำให้กิจกรรมเอนไซม์ลดลง (Martin *et al.*, 2014) จากผลการศึกษาระยะเวลาในการบ่มเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบพบว่าเอนไซม์มีกิจกรรมที่ดีที่สุดเมื่อทำการบ่มเป็นเวลา 10 นาที ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเอนไซม์เพิ่มขึ้นเป็น 20 ถึง 120 นาที พบว่ากิจกรรมเอนไซม์จะลดลงแต่ก็ยังคงรักษากิจกรรมไว้ได้มากกว่าร้อยละ 50 บ่งบอกถึงการจับกันระหว่างเอนไซม์กับซับสเตรตสามารถจับกันได้ดี นำไปสู่การเกิดเอนไซม์ซับสเตรตคอมเพล็กซ์ (enzyme substrate complex) เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงไปจนได้สารผลิตภัณฑ์ในเวลาที่รวดเร็ว และยังคงความสามารถของกิจกรรมได้ในช่วงเวลาที่กว้าง ส่งผลดีต่อการนำเอนไซม์ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพในการช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมี (Sawant and Thumar, 2023)

การประยุกต์ใช้เอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบต่อการขจัดคราบเปื้อนซีอิ๊วบนผ้าฝ้าย พบว่าสามารถเริ่มขจัดคราบได้เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง และสามารถขจัดคราบได้ดีที่สุดเมื่อใช้เวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากซีอิ๊วผลิตจากองค์ประกอบหลัก คือ ถั่วเหลือง ซึ่งมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเอนไซม์โบรมีเลนจะทำหน้าที่ในการสลายหมู่เอไมด์ (amide) หรือพันธะเปปไทด์ (peptide bond) ในโมเลกุลของโปรตีนให้มีขนาดเล็กลงซึ่งจะช่วยทำให้ขจัดคราบได้ง่ายขึ้น (Muthuganesan, n.d.) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Bhagavathy *et al.* (2019) ที่แสดงถึงความสามารถของเอนไซม์โบรมีเลนในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการขจัดคราบโปรตีนโดยนำเอนไซม์โบรมีเลนจากส่วนต่าง ๆ ของสับปะรด ประเทศอินเดีย มาใช้ในการสลายคราบบนผ้าที่ปนเปื้อนซีอิ๊ว ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในเวลา 15 นาที หรือการใช้เอนไซม์โบรมีเลนผสมกับโซเดียมคาร์บอเนตในความเข้มข้น 9.8 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อลดเวลาการทำให้รังไหมอ่อนตัวลงจาก 20 ชั่วโมง เป็น 30 นาที (Singh *et al.*, 2003) เป็นต้น จากความสามารถในการขจัดคราบของเอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดได้ในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการซักฟอก รวมทั้งสามารถพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เอนไซม์สำหรับการดูแลสิ่งทอในอนาคต

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เปรียบเทียบกิจกรรมเอนไซม์โบรมีเลนสกัดหยาบจากส่วนแกน เปลือกและเนื้อของสับปะรดภูเก็ต รวมถึงศึกษาความแตกต่างระหว่างผลดิบและผลสุก ผลการทดลองพบว่ากิจกรรมเอนไซม์สูงสุดได้จากส่วนเนื้อของสับปะรดภูเก็ตผลสุก โดยแสดงค่ากิจกรรมสูงสุดที่ 5.4 ยูนิตต่อ

มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 10 นาที นอกจากนี้การประเมินประสิทธิภาพของสารสกัดเอนไซม์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.5 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการขจัดคราบซีอิ๊วบนผ้าฝ้าย พบว่าเอนไซม์โบรมีเลนที่สกัดจากส่วนเนื้อของสับปะรดสุกสามารถขจัดคราบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อแช่ผ้าในสารสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเอนไซม์โบรมีเลนจากส่วนเนื้อของสับปะรดสุกมีศักยภาพสูงสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมซักฟอก และอาจนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เอนไซม์สำหรับการดูแลสิ่งทอในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้สิ่งอำนวยความสะดวกและทรัพยากร ทำให้การวิจัยดำเนินไปได้อย่างราบรื่น รวมทั้งขอขอบคุณอาจารย์จิราภรณ์ กวดขัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของงานวิจัย และขอแสดงความขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการวิพากษ์เชิงสร้างสรรค์และข้อเสนอแนะอันมีค่า ซึ่งช่วยยกระดับคุณภาพของการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- จารุพันธ์ ทองแถม. (2526). *สับปะรดและอุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาวิณีเย์ เจริญยิ่ง. (2559). *สับปะรดภูเก็ต*. สืบค้นเมื่อ 5 พฤษภาคม 2566, จาก: https://www.khaosod.co.th/technologychaoban/techno/plants-vegetables-fruit/article_6226.
- มนตรี กล้าขาย. (2559). เกษตรหลังเกษียณ ปลุกสับปะรดในถุงพลาสติกพลิกวิกฤตให้เป็นโอกาส. *เทคโนโลยีชาวบ้าน*, 28(625), 41-42.
- อภัสสร ศิริจริยวัตร และกาญจนาพร นนทะลุน. (2563). กิจกรรมการย่อยโปรตีนของสารสกัดหยาบจากส่วนต่าง ๆ ของสับปะรดและมะละกอ. *แก่นเกษตร*, 48(พิเศษ 1), 1887-1092.
- Arshad, Z.I.M., Amid, A., Yusof, F., Jaswir, I., Ahmad, K. and Loke, S.P. (2014). Bromelain: An overview of industrial application and purification strategies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(17), 7283-7297, doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5889-y>.
- Babu, B.R., Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S. (2008). Liquid-liquid extraction of bromelain and polyphenol oxidase using aqueous two-phase system. *Chemical Engineering and Processing*, 47(1), 83-89, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.08.006>.
- Bhagavathy, S., Gayathridevi, R., Pushya, K. and Jeniffer, J. (2019). Screening, optimization and antimicrobial activity of bromelain from *Ananas comosus*. *International Journal of Scientific Development and Research*, 4(8), 233-240.

- Bonner, P.L.R. (2007). *Protein purification*. London: Taylor and Francis Group.
- Dubey, R., Reddy, S. and Murthy, N.Y.S. (2012). Optimization of activity of bromelain. *Asian Journal of Chemistry*, 24(4), 1429-1431.
- Gu, Y. (2024). The effect of buffer pH on enzyme activity. *Theoretical and Natural Science*, 33, 137-147, doi: <https://doi.org/10.54254/2753-8818/33/20240893>.
- Harrach, T., Eckert, K., Schulze-Forster, K., Nuck, R., Grunow, D. and Maurer, H.R. (1995). Isolation and partial characterization of basic proteinases from stem bromelain. *Journal of Protein Chemistry*, 14(1), 41-52, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01902843>.
- Hebbar, H.U., Hemavathi, A.B., Sumana, B. and Raghavarao K.S.M.S. (2011). Reverse micellar extraction of bromelain from pineapple (*Ananas comosus* L. merry) waste: Scale-up, reverse micelles characterization and mass transfer studies. *Separation Science and Technology*, 46(10), 1656-1664, doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.572110>.
- Hossain, M.M., Lee, S.I. and Kim, I.H. (2015). Effects of bromelain supplementation on growth performance, nutrient digestibility, blood profiles, faecal microbial shedding, faecal score and faecal noxious gas emission in weanling pigs. *Veterinarni Medicina*, 60(10), 544-552, doi: <https://doi.org/10.17221/8493-VETMED>.
- Jutamongkon, R. and Charoenrein, S. (2010). Effect of temperature on the stability of fruit bromelain from smooth cayenne pineapple. *Agriculture and Natural Resources*, 44(5), 943-948.
- Kavitha, S., Kumar, S.A., Yogalakshmi, K.N., Kaliappan, S. and Banu, J.R. (2013). Effect of enzyme secreting bacterial pretreatment on enhancement of aerobic digestion potential of waste activated sludge interceded through EDTA. *Bioresource Technology*, 150, 210-219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.021>.
- Ketnawa, S., Chaiwut, P. and Rawdkuen, S. (2011). Aqueous two-phase extraction of bromelain from pineapple peels ('Phu Lae' cultiv.) and its biochemical properties. *Food Science and Biotechnology*, 20(5), 1219-1226, doi: <https://doi.org/10.1007/s10068-011-0168-5>.
- Ketnawa, S., Chiwut, P. and Rawduken, S. (2012). Pineapple wastes: A potential source for bromelain extraction. *Food and Bioproducts Processing*, 90(3), 385-391, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.12.006>.
- Koh, J., Kang, S.-M., Kim, S.-J., Cha, M.-K. and Kwon, Y.-J. (2006). Effect of pineapple protease on the characteristics of protein fibers. *Fibers and Polymers*, 7(2), 180-185, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02908264>.

- Martins, B.C., Rescolino, R., Coelho, D.F., Zanchetta, B., Tambourgi, E.B. and Silveira, E. (2014). Characterization of bromelain from *Ananas comosus* agroindustrial residues purified by ethanol fractional precipitation. *Chemical Engineering Transactions*, 37, 781-786, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1437131>.
- Mohan, R., Sivakumar, V., Rangasamy, T. and Muralidharan, C. (2016). Optimisation of bromelain enzyme extraction from pineapple (*Ananas comosus*) and application in process industry. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 12(3), 188-195, doi: <https://doi.org/10.3844/ajbbbsp.2016.188.195>.
- Mohapatra, A., Rao, V.M. and Ranjan, M. (2013). Comparative study of the increased production and characterization of bromelain from the peel, pulp and stem pineapple (*Anannus commas*). *International Journal of Advanced Research and Technology*, 2, 249-279.
- More, K., Popalghat, S., Yadav, S. and Namekar, T. (2019). Extraction and partial purification of bromelain from fruit and crown of pineapple (*Ananas comosus*) and it's application as a meat tenderizer. *International Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 9(3), 1361-1367.
- Murachi, T. and Neuratii, H. (1960). Fractionation and specificity studies on stem bromelain. *Journal of Biological Chemistry*, 235(1), 99-107, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)69593-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)69593-6).
- Muthuganesan, N. (n.d.). *Biodetergents*. Retrieved 24 March 2024, from: <https://www.slideshare.net/slideshow/biodetergents/215498336>.
- Poh, S.S. and Abdul Majid, F.D. (2011). Thermal stability of free bromelain and bromelain-polyphenol complex in pineapple juice. *International Food Research Journal*, 18(3), 1051-1060.
- Sangkharak, K., Wangsirikul, P., Pichid, N., Yunu, T. and Prasertsan, P. (2016). Partitioning of bromelain from pineapple stem (*Smooth Cayenne*) by aqueous two phase system and its application for recovery and purification of polyhydroxyalkanoate. *Chiang Mai Journal of Science*, 43(4), 794-807.
- Sawant, P. and Thumar, J. (2023). Impact of substrate pH and enzyme-substrate incubation time on protease from a new halo-tolerant Bor S17B13 found in the mangroves of Western India. *Acta Scientific Microbiology*, 6(3), 3-9, doi: <https://doi.org/10.31080/ASMI.2023.06.1210>.
- Silvestre, M.P.C., Carreira, R.L., Silva, M.R., Corgosinho, F.C., Monteiro, M.R.P., Morais, H.A. (2012). Effect of pH and temperature on the activity of enzymatic extracts from pineapple peel. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1824-1831, doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0616-5>.

- Singh, L.R., Devi, Y.R. and Devi, S.K. (2003). Enzymological characterization of pineapple extract for potential application in oak tasar (*Antheraea proylei* J.) silk cocoon cooking and reeling. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6(3), 198-207, doi: <https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-4>.
- Sivakumar, V. and Kumar, D. (2012). Leather bioprocess intensification: Ultrasound assisted novel enzymatic hair-loosening system for leather processing. *Indian Journal of Biotechnology*, 11(3), 326-329.
- Vallés, D., Furtado, S. and Cantera, A.M.B. (2007) Characterization of news proteolytic enzymes from ripe fruits of *Bromelia antiacantha* bertol. (Bromeliaceae). *Enzyme and Microbial Technology*, 40(3), 409-413, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.07.011>.
- Walsh, G. (2014). *Proteins: Biochemistry and biotechnology*. (2nd ed). New York: John Wiley & Sons Ltd.

ศักยภาพของหนอนแมลงวันลายในการเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่น
ในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย
และความเข้มสีของปลาแฟนซีคาร์ป

Potential of Black Soldier Fly Larvae as a Fish Meal Replacement
in Diet on Growth Performance, Survival Rate and
Coloration in Fancy Carp Fish (*Cyprinus carpio*)

วรรณัย ศรีศักดิ์¹ บุญทริกา ทองดอนพุ่ม¹ พชรธร สิมกิง²
และกิตติมา วานิชกุล^{1*}

Wantanai Srisakda¹, Boontarika Thongdonphum¹, Pacharathon Simking²
and Kittima Vanichkul^{1*}

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายต่อ อัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มสีของปลาแฟนซีคาร์ป โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ชุด คือ อาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ 0 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดำเนินการทดลองโดยเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ปในตู้กระจกเป็นเวลา 30 วัน ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักสุดท้าย อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการรอดตายมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง ($p > 0.05$) แต่อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สีบนผิวหนังปลาแฟนซีคาร์ปมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คุณภาพน้ำในตู้เลี้ยงระหว่างการเลี้ยงมีความเหมาะสม จากผลการศึกษารูปลักษณ์ได้ว่าการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลาย ไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มสีของปลาแฟนซีคาร์ป ซึ่งแสดงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ในการพัฒนาสูตรอาหารสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำต่อไป

คำสำคัญ: โปรตีนทางเลือก อาหารสัตว์น้ำ การพัฒนาสูตรอาหาร อัตราการเจริญเติบโต สีผิวปลา

¹ สาขาวิชาประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาการพยาบาลสัตว์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* Corresponding author e-mail: Kittima_v@rmutt.mail.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2025.v44i2.265778>

Received: 25 December 2024, Revised: 14 February 2025, Accepted: 24 February 2025

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of replacing fish meal with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) on the growth performance, survival rate, and coloration of fancy carp (*Cyprinus carpio*). Four experimental diets were formulated with black soldier fly larvae replacing fish meal at 0%, 25%, 50%, and 75%. The experiment was conducted in glass aquaria for 30 days. The results revealed no significant differences ($p > 0.05$) among treatments in final weight, specific growth rate (SGR), or survival rate. However, the feed conversion ratio (FCR) differed significantly ($p < 0.05$). Skin coloration, including lightness (L^*), redness (a^*), and yellowness (b^*), showed no significant differences ($p > 0.05$) among treatments. Water quality parameters during the rearing period remained within acceptable ranges. The results indicate that replacing fish meal with black soldier fly larvae does not adversely affect growth performance, survival rate, and coloration in fancy carp, demonstrating its potential as a viable alternative protein source for aquaculture feed formulation.

Keywords: Alternative protein, Aquafeed, Feed formulation development, Growth performance, Fish skin pigmentation

บทนำ

ปลาป่น (fish meal) เป็นแหล่งโปรตีนหลักที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์น้ำ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางโภชนาการที่เหมาะสม มีโปรตีนคุณภาพสูงในปริมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ และมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนและไขมันที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ทำให้ปลาป่นถูกนำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ในหลายอุตสาหกรรม (Gatlin *et al.*, 2007; Tocher, 2015; FAO, 2020) อย่างไรก็ตามปัจจุบันปลาป่นมีปริมาณการผลิตลดลง อีกทั้งมีคุณภาพไม่คงที่ขึ้นกับคุณภาพของปลาที่นำมาผลิต และมีแนวโน้มราคาที่สูงขึ้นในปัจจุบัน รวมถึงข้อจำกัดด้านความยั่งยืนของแหล่งวัตถุดิบ (FAO, 2020) เนื่องจากการใช้ทรัพยากรปลาธรรมชาติมาใช้ในการผลิต (Tacon and Metian, 2008) นอกจากปัญหาปริมาณและความยั่งยืนของปลาป่นแล้ว งานวิจัยอีกจำนวนมากได้ให้ความสนใจต่อการใช้วัตถุดิบทางเลือกจากเศษเหลือในอุตสาหกรรมประมง เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร เช่น การนำเศษเหลือจากการแปรรูปปลาทะเล มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนและกรดอะมิโนเข้มข้นที่สามารถใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำเศรษฐกิจได้ (Caruso *et al.*, 2020; Madende and Hayes, 2020) โดยมีรายงานว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารของปลากะรังจุดฟ้าเล็ก (*Plectropomus leopardus*) (Giri *et al.*, 2021), กุ้งขาวแวนนาไม (*Penaeus vannamei*) (De *et al.*, 2020) รวมถึงปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) (แจ่มจันทร์ และทวีเดช, 2567) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม แม้เศษเหลือจากการแปรรูปปลาทะเลจะเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความเค็มจากกระบวนการเก็บ

รักษาซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อสัตว์น้ำบางชนิด (Harpaz *et al.*, 2005) ส่งผลให้นักวิจัยและผู้ผลิตอาหารสัตว์ได้พยายามหาแหล่งโปรตีนอื่นที่มีสารอาหารเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำเพื่อทดแทนการใช้ปลาป่น โปรตีนจากแมลงจึงถูกนำเข้ามาเพื่อพัฒนาวัตถุดิบทดแทนปลาป่น เพื่อลดการใช้ปลาป่นและเพิ่มความยั่งยืนของการผลิต (Gatlin *et al.*, 2007)

หนอนแมลงวันลาย (black soldier fly larvae) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hermetia illucens* เป็นหนึ่งในแหล่งโปรตีนที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านปริมาณโปรตีนสูงประมาณ 42-60 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 10-35 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเลี้ยงด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เศษผัก เศษผลไม้ รวมถึงอาหารเหลือทิ้ง มีความสามารถในการเปลี่ยนของเสียทางชีวภาพให้เป็นโปรตีนคุณภาพสูงได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์มีการนำหนอนแมลงวันลายไปใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (da Silva and Hesselberg, 2020) หนอนแมลงวันลายที่สกัดไขมันออกสามารถทดแทนปลาป่นในอาหารได้บางส่วนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ โดยมีรายงานในปลากัด (*Betta splendens*) (Kari *et al.*, 2023) ปลาไหลญี่ปุ่น (*Anguilla japonica*) (Kuo *et al.*, 2022) และปลาเทราต์สายรุ้ง (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) (Renna *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023) นอกจากนี้หนอนแมลงวันลายมีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมประมาณ 2.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Secci *et al.*, 2018) แต่ทั้งนี้องค์ประกอบทางโภชนาการของหนอนแมลงวันลายขึ้นอยู่กับวัสดุตั้งต้น (bedding substant) และอาหารที่หนอนแมลงวันลายได้รับ (Newton *et al.*, 1977; Diener *et al.*, 2009)

การเพาะเลี้ยงปลาสวยงามเป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (Pandey and Mandal, 2017; Saengsitthisak *et al.*, 2020) อาหารที่ใช้เลี้ยงนั้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และสีส้มของปลา ซึ่งสีส้มของปลาส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยตรงด้วยวิตามินที่เรียกว่าแคโรทีนอยด์ เพื่อรักษาระดับของเม็ดสีในผิวหนังและกล้ามเนื้อ ปลาสวยงามจึงมักได้รับอาหารที่เสริมด้วยแคโรทีนอยด์เป็นหลัก (Chatzifotis *et al.*, 2005)

ดังนั้นการศึกษาผลของการใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่นในอาหารเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ปเพื่อประเมินการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และสีผิวของปลานั้นจะช่วยให้ได้ข้อมูลผลการใช้โปรตีนทดแทนจากหนอนแมลงวันลายกับปลาสวยงาม เช่น ปลาแฟนซีคาร์ป (*Cyprinus carpio*) ซึ่งเป็นปลาสวยงามน้ำจืดที่นิยมเลี้ยงและมีมูลค่าทางการตลาดสูง ซึ่งข้อมูลในการศึกษานี้สามารถประยุกต์ใช้หนอนแมลงวันลายในการทดแทนปลาป่นสำหรับการเลี้ยงปลาสวยงามสายพันธุ์ปลาการ์ป และสัตว์น้ำอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

การศึกษาผลของการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มสีของปลาแฟนซีคาร์ป วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) โดยแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ๆ 3 ซ้ำ (replication) โดยผสมหนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่นในอาหารที่ระดับแตกต่างกัน ได้แก่ 0 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2. การเตรียมหนอนแมลงวันลาย

นำหนอนแมลงวันลายแช่แข็งที่ได้จาก Thai Nature Creation (TNC) ฟาร์มเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย จังหวัดสมุทรสาคร ไปแช่น้ำเพื่อละลายน้ำแข็ง นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบลมร้อน (hot air oven) ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นวัตถุบดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบผสมในสูตรอาหาร ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ตามวิธี AOAC (2000) พบว่าหนอนแมลงวันลายป่นมีโปรตีน 39.8 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 34.2 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณความชื้น 3.7 เปอร์เซ็นต์

3. การเตรียมอาหารทดลอง

นำวัตถุดิบอาหารประกอบด้วย ปลาป่น 25 เปอร์เซ็นต์ หัวกุ้งป่น 5 เปอร์เซ็นต์ ตับหมึกป่น 6 เปอร์เซ็นต์ กากถั่วเหลือง 15 เปอร์เซ็นต์ ปลาข้าว 14 เปอร์เซ็นต์ รำข้าว 5 เปอร์เซ็นต์ ยีสต์ 5 เปอร์เซ็นต์ แป้งสาลี 12 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณวิตามินรวม 1 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันตับหมึก 2 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันพืช 2 เปอร์เซ็นต์ สารละลายโปรไลโน 5 เปอร์เซ็นต์ เลซิทีน 1 เปอร์เซ็นต์ และสารเหนียว 1 เปอร์เซ็นต์ (ดัดแปลงจากกองวิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์น้ำ, 2563) มาผสมอาหารทดลอง 4 ชุดการทดลอง โดยมีการใช้หนอนแมลงวันลายป่นทดแทนปลาป่นในวัตถุดิบอาหารในอัตราส่วน 0 (ชุดควบคุม) 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยวัตถุดิบทั้งหมดในแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาบดละเอียดและชั่งตามสัดส่วนที่กำหนด ก่อนผสมแบบแห้งจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปอัดเม็ดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ให้อาหารเย็นตัวลง เก็บอาหารในถุงพลาสติกปิดผนึก และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้เลี้ยงปลาแพนซีคาร์ป โดยอาหารทดลองจะถูกสุ่มเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และความชื้น ตาม AOAC (2000) โดยแต่ละสูตรอาหารมีปริมาณโปรตีน 33.6 33.5 31.3 และ 30.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณไขมัน 7.3 11.2 12.0 และ 13.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และปริมาณความชื้น 7.2 7.1 6.6 และ 6.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. การเตรียมปลาและดำเนินการ

นำปลาแพนซีคาร์ปขนาด 3-4 นิ้ว จำนวน 200 ตัว มาพักเพื่อปรับสภาพก่อนลงเลี้ยง 7 วัน ในบ่อขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 บ่อ มีการให้อากาศตลอดเวลา และให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลาสวยงาม 2 ครั้งต่อวัน หลังจากนั้นทำการปล่อยปลาลงเลี้ยงในตู้กระจกขนาด 80 x 50 x 50 เซนติเมตร ตู้ละ 12 ตัว จำนวน 12 ตู้ ในตู้มีการติดกรองของเสียและให้อากาศตลอดเวลา ให้อาหารปลาตามชุดการทดลองที่ได้รับ ให้ปลากินจนอิ่มภายในระยะเวลา 20 นาที วันละ 2 มื้อ เวลา 07.30 น. และ 17.30 น. จัดบันทึกปริมาณอาหารที่ให้ มีการดูดตะกอนของเสีย และเปลี่ยนถ่ายน้ำในตู้เลี้ยงทุก ๆ 7 วัน ครั้งละ 50 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำในตู้เลี้ยง

5. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการเก็บข้อมูลก่อนเริ่มการทดลองระหว่างการทดลองทุก ๆ 15 วัน และสิ้นสุดการทดลอง เป็นระยะเวลา 30 วัน โดยทำการสุ่มปลาจำนวน 20 เปอร์เซ็นต์ของปลาทดลอง บันทึกน้ำหนักปลา อาหารที่ให้ปลากิน จำนวนปลาที่เหลือรอดในแต่ละซ้ำ (ตู้เลี้ยง) เพื่อนำมาคำนวณอัตราการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย (average initial body weight) น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย (average final body weight) น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (average weight gain) อัตราการเจริญเติบโต

เฉลี่ยต่อวัน (average daily growth) ปริมาณอาหารที่กิน (feed intake) อัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio) อัตราการรอดตาย (survival rate) ดังสมการ (1) - (5)

$$\text{น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น} = \text{น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย} \quad (1)$$

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย}}{\text{ระยะเวลาเลี้ยง}} \quad (2)$$

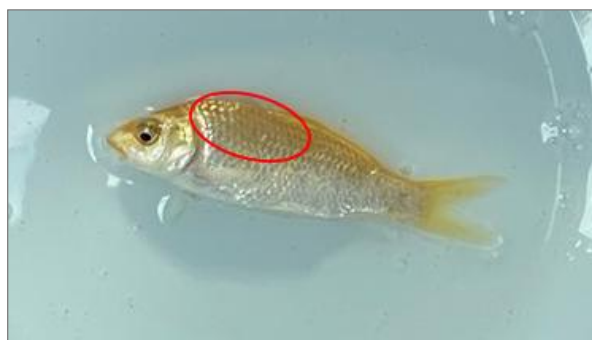
$$\text{ปริมาณอาหารที่กิน} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลาทดลอง}} \quad (3)$$

$$\text{อัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด}}{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น}} \quad (4)$$

$$\text{อัตราการรอดตาย} = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือรอดทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลาทดลอง}} \times 100 \quad (5)$$

ทำการวัดสีโดยสุ่มปลา 20 เปอร์เซนต์ มาทำการสลับด้วยน้ำมันกานพลู และใช้เครื่องวัดสียี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan EZ 45/0 (LAV) มาแตะวัดค่าสีบริเวณผิวหนังเหนือเส้นข้างลำตัวทั้ง 2 ข้าง (ภาพที่ 1) บันทึกค่าสีที่วัดได้จากเครื่อง ได้แก่ ค่าความสว่าง (lightness: L*) ความเป็นสีแดง (redness: a*) และความเป็นสีเหลือง (yellowness: b*)

มีการวัดค่าคุณภาพน้ำบางประการ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ (temperature) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolve oxygen) ความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องวัดคุณภาพน้ำหลายตัวแปรยี่ห้อ Hach (HQ40D) ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีการไตเตรท (titration) ทุก ๆ สัปดาห์



ภาพที่ 1 ตำแหน่งการวัดสีปลาแพนซีคาร์ป

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มข้น ที่ได้จากแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนโดยใช้วิธีวิเคราะห์ analysis of variance (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิจัย

1. ผลของการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันป่นในอาหารที่ระดับแตกต่างกันต่อ อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลาแฟนซีคาร์ป

จากผลการทดลองเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ปด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลาย ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปลาแฟนซีคาร์ปมีการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างกัน โดยปลาแฟนซีคาร์ปที่ได้รับอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายในอาหารที่ระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายและมีน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น รวมถึงมีอัตราการเจริญเติบโตวันสูงสุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่น ๆ ($p > 0.05$) ด้านอัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อปลาแฟนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำสุด (2.74 ± 0.09) ไม่มีความแตกต่างจากปลาแฟนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่แตกต่างกับปลาแฟนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปริมาณอาหารที่กินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปลาแฟนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอาหารที่กินน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากชุดการทดลองอื่น แต่อย่างไรก็ตามปลาแฟนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 50 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และอัตราการรอดตายในทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วง 97.22 ± 4.81 - 100 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างชุดทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเจริญเติบโตของปลาแฟนซีคาร์ปได้รับอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายป่นที่ระดับแตกต่างกัน เป็นเวลา 30 วัน

ค่าพารามิเตอร์	ระดับการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายป่น (เปอร์เซ็นต์)				F-test
	0	25	50	75	
1. น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)	12.77 $\pm$ 0.53	12.76 $\pm$ 0.03	12.77 $\pm$ 0.59	12.73 $\pm$ 0.17	ns
2. น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม)	18.51 $\pm$ 0.62	17.97 $\pm$ 0.85	17.32 $\pm$ 0.26	17.66 $\pm$ 0.99	ns
3. น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	5.74 $\pm$ 0.13	5.21 $\pm$ 0.85	4.54 $\pm$ 0.34	4.93 $\pm$ 0.83	ns
4. อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (กรัมต่อวัน)	0.19 $\pm$ 0.00	0.17 $\pm$ 0.03	0.15 $\pm$ 0.01	0.16 $\pm$ 0.03	ns
5. ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม)	15.73 $\pm$ 0.35 ^a	16.64 $\pm$ 0.22 ^b	16.65 $\pm$ 0.70 ^b	17.03 $\pm$ 0.27 ^b	*

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ค่าพารามิเตอร์	ระดับการทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายปน (เปอร์เซ็นต์)				F-test
	0	25	50	75	
6. อัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	2.74±0.09 ^a	3.25±0.51 ^{ab}	3.67±0.22 ^b	3.51±0.53 ^b	*
7. อัตราการรอดตาย (เปอร์เซ็นต์)	100±0.00	97.22±4.81	100±0.00	100±0.00	ns

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- * และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2. ผลของการทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันปนในอาหารที่ระดับแตกต่างกันต่อความเข้มสีของปลาแฟนซีคาร์ป

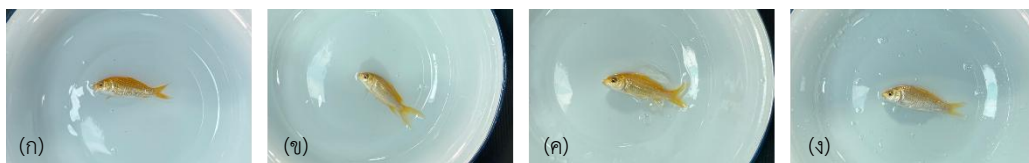
การวัดสีที่ผิวตัวปลาแฟนซีคาร์ป พบว่าค่าความสว่าง (L^*) เริ่มต้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ปเป็นระยะเวลา 15 และ 30 วัน ค่าความสว่างสีที่วัดได้มีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงใกล้เคียงกัน และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เริ่มต้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ปเป็นระยะเวลา 15 วัน ปลาแฟนซีคาร์ปมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลองแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าสีแดงบนผิวปลาแฟนซีคาร์ปยังคงมีค่าใกล้เคียงกับที่ 15 วัน โดยทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เริ่มต้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเลี้ยงปลาแฟนซีคาร์ป เป็นระยะเวลา 15 และ 30 วัน ค่าสีเหลืองบนผิวปลาแฟนซีคาร์ปลดลงเล็กน้อย แต่ทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2 และภาพที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าสี (L^* a^* และ b^*) ของปลาแฟนซีคาร์ปที่ได้รับอาหารทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายปนที่ระดับแตกต่างกันเป็นเวลา 30 วัน

ค่าสี	ระยะเวลา	ระดับการทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายปน (เปอร์เซ็นต์)				F-test
		0	25	50	75	
L^*	เริ่มต้น	57.41±4.13	60.43±3.26	60.26±3.97	59.16±3.73	ns
	15 วัน	54.44±0.68	55.56±3.17	52.75±0.64	53.61±0.96	ns
	30 วัน	49.76±1.62	49.07±2.72	48.79±0.51	49.72±1.83	ns
a^*	เริ่มต้น	3.20±0.89	2.91±0.16	3.00±0.06	3.16±0.36	ns
	15 วัน	7.52±0.69	7.16±0.28	7.58±1.07	7.28±0.50	ns
	30 วัน	7.02±0.53	7.23±0.49	7.34±0.53	7.12±0.84	ns
b^*	เริ่มต้น	31.66±1.84	31.20±0.37	31.54±1.17	31.52±4.63	ns
	15 วัน	25.87±0.40	25.21±1.69	25.22±1.21	25.23±0.93	ns
	30 วัน	22.97±0.72	22.63±0.76	22.45±0.47	23.32±0.31	ns

หมายเหตุ: - รายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

- ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในระดับเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
- ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 2 สีผิวของปลาแพนซีคาร์ปที่ได้รับอาหารทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายปนที่ระดับแตกต่างกัน ได้แก่ 0 (ก) 25 (ข) 50 (ค) และ 75 เปอร์เซ็นต์ (ง) หลังจากเลี้ยงเป็นระยะเวลา 30 วัน

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำในตู้ทดลอง พบว่าอุณหภูมิมีค่าอยู่ระหว่าง 28.07-32.75 องศาเซลเซียส ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 6.29-7.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างมีค่าอยู่ระหว่าง 7.61-8.20 แอมโมเนียรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06-0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนโตรที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.00-0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายในระดับ 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของปลาแพนซีคาร์ป ในด้านน้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย และอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง อย่างไรก็ตามค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed conversion ratio: FCR) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในปลาแพนซีคาร์ปที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายในระดับ 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าหนอนแมลงวันลายที่ใช้ผสมในอาหารทดลองมีไขมันเป็นองค์ประกอบสูงถึง 34.2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สัดส่วนหนอนแมลงวันลายที่เพิ่มขึ้นในอาหารทดลองส่งผลให้ปริมาณไขมันในอาหารเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณไขมันในอาหารปลาที่เกินระดับที่เหมาะสมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้โปรตีนเพื่อการเจริญเติบโต (Makkar *et al.*, 2014) และทำให้ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากอาหารสัตว์น้ำน้อยลงส่งผลให้ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Du *et al.* (2006) ที่รายงานว่าปลาฉา (*Ctenopharyngodon idella*) ที่ได้รับอาหารที่มีไขมันในระดับสูง แสดงอัตราการกินอาหารลดลง อัตราการเจริญเติบโตต่ำลง และประสิทธิภาพการใช้อาหารลดลง ในขณะที่น้ำหนักเนื้อเยื่อไขมันในช่องท้องเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Li *et al.* (2017) ระบุว่าปลาไน (*C. carpio* var. Jian) ที่ได้รับอาหารสูตรทดแทนปลาปนด้วยหนอนแมลงวันลายอบแห้งที่ผ่านการสกัดไขมันออกในระดับ 0 25 50 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา

ของ Tipayadara *et al.* (2021) ที่พบว่าปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายป่นอบแห้งในระดับ 0 10 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านอัตราการเจริญเติบโต

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในปลาบางชนิดแสดงผลที่แตกต่างกัน เช่น การศึกษาของ Kroeckel *et al.* (2012) พบว่าการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายอบแห้งในอาหารปลาลิ้นหมา (*Psetta maxima*) ที่ระดับ 0 17 33 49 64 และ 76 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของหนอนแมลงวันลายในอาหาร ในขณะที่การศึกษาของ Khieokhajonkhet *et al.* (2022) พบว่าปลาทอง (*Carassius auratus*) ที่ได้รับอาหารสูตรทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายป่นอบแห้งที่ระดับ 0 43 84 145 และ 210 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม แสดงอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของหนอนแมลงวันลายที่เพิ่มขึ้นในอาหาร ความแตกต่างของผลการทดลองเหล่านี้เกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น สายพันธุ์ ขนาดปลา ชนิดแมลง อาหารของแมลง และกระบวนการแปรรูปแมลง (Tschirmer and Simon, 2015) ในด้านอัตราการรอดตายของปลาแพนซีคาร์ป ในการทดลองนี้ทุกชุดการทดลองแสดงผลอัตราการรอดตายมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และไม่พบความแตกต่างกันของอัตราการรอดตายในทุกชุดการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ที่วัดได้จากผิวหนังบริเวณเหนือเส้นข้างลำตัวของปลาแพนซีคาร์ปที่ได้รับอาหารทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายในระดับ 0 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตลอดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ในบางช่วงมีค่าสูงขึ้นเมื่อปลาแพนซีคาร์ปได้รับอาหารทุกชุดทดลอง อาจเนื่องมาจากในสูตรอาหารที่ใช้ในการทดลองมีสาหร่ายเป็นส่วนผสม 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ในอาหารเพิ่มขึ้น เกิดการสะสมในผิวหนังของปลา ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงขึ้น (Gouveia *et al.*, 2003) แคโรทีนอยด์ที่มีในอาหารมีผลต่อสีของปลา ทำให้สีเข้มขึ้น เพิ่มความสวยงาม โดยปลานั้นไม่สามารถสังเคราะห์แคโรทีนอยด์เอง (Ebenezar *et al.*, 2020) แหล่งอาหารจึงเป็นส่วนสำคัญของสีที่เกิดบนผิวของปลา หนอนแมลงวันลายมีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมอยู่ที่ 2.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Secchi *et al.*, 2018) ซึ่งมีปริมาณสารสีน้อยกว่าปริมาณหนอนแมลงวันลายที่ใช้ในอาหารทดลองจึงทำให้ปริมาณสารสีในอาหารมีไม่มาก จึงไม่ส่งผลต่อสีบนผิวหนังของปลาแพนซีคาร์ปในการทดลองนี้ นอกจากนี้การศึกษาของอรพินท์ และคณะ (2548) ได้รายงานว่ปลาแพนซีคาร์ปที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมแคโรทีนอยด์รวม 96.2 และ 103.9 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่งผลต่อค่าสีแดงบนผิวหนังมากกว่าปลาแพนซีคาร์ปกลุ่มอื่น ๆ ($p < 0.05$)

ในส่วนคุณภาพน้ำบางประการระหว่างการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณไนไตรท์ อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ (นิคม, 2562)

สรุปผลการวิจัย

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยหนอนแมลงวันลายในอาหารเลี้ยงปลาแพนซีคาร์ปครั้งนี้ ทำให้ทราบว่าหนอนแมลงวันลายสามารถใช้เป็นวัตถุดิบแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำได้ ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มสีของ

ปลาแพนซีคาร์ป นอกจากนี้นี้ยังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในการเลี้ยง แต่การใช้ในปริมาณที่สูงนั้น อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้อาหารเพื่อการเจริญเติบโต ข้อมูลในการทดลองสามารถเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้หนอนแมลงวันลายทดแทนปลาป่นเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนในการผลิตสัตว์น้ำ เพื่อพัฒนาการเลี้ยงสัตว์น้ำได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

หนอนแมลงวันลายเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันสูง เมื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนในสูตรอาหารสำหรับปลาแพนซีคาร์ป จะส่งผลให้ปริมาณไขมันในอาหารเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการทดแทนที่สูงขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของไขมันในอาหารอาจมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลา เนื่องจากไขมันส่วนเกินอาจลดประสิทธิภาพการใช้โปรตีนในกระบวนการเติบโต ดังนั้นจึงควรพิจารณาการลดปริมาณไขมันในหนอนแมลงวันลายให้สอดคล้องกับปริมาณไขมันในปลาป่น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ทดแทน นอกจากนี้องค์ประกอบทางโภชนาการของหนอนแมลงวันลายอาจแปรผันตามชนิดและคุณภาพของอาหารที่ใช้เลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 (รหัสโครงการวิจัย FRB67E0203B.3) (รหัสคำรับรอง FRB670027/0168)

เอกสารอ้างอิง

- กองวิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์น้ำ. (2563). สูตรอาหารปลาสวยงามกลุ่มกินเนื้อ (ปลากัด/หมอสี/ออสการ์/พาราไดซ์). สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2567, จาก: https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200514121442_new.pdf.
- แจ่มจันทร์ เพชรศิริ และทวีเดช ไชยนาพพงษ์. (2567). การประยุกต์ใช้เศษเหลือจากการแปรรูปปลาทะเลในสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* Bloch, 1790) ที่เลี้ยงในน้ำจืด. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 43(1), 80-92.
- นิคม ละอองศิริวงศ์. (2562). *คู่มือการวิเคราะห์น้ำ เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการตรวจรับรองมาตรฐานฟาร์ม*. เชียงใหม่: วนิตการพิมพ์.
- อรพินท์ จินตสถาพร บัณฑิต ยวงสร้อย และประเสริฐ สมิตธิวงศ์. (2548). ระดับเหมาะสมของคาร์โบไฮเดรตต่อความเข้มข้นปลาคาร์ป (*Cyprinus carpio*). ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43: สาขาประมง สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม* (หน้า 368-378). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- AOAC. (2000). *Official methods of analysis*. (17th ed). Maryland: The Association of Official Analytical Chemists.

- Caruso, G., Floris, R., Serangeli, C. and Paola, L.D. (2020). Fishery wastes as a yet undiscovered treasure from the sea: Biomolecules sources, extraction methods and valorization. *Marine Drugs*, 18(12), 622, doi: <https://doi.org/10.3390/md18120622>.
- Chatzifotis, S., Pavlidis, M., Jimeno, C.D., Vardanis, G., Sterioti, A. and Divanach, P. (2005). The effect of different carotenoid sources on skin coloration of cultured red porgy (*Pagrus pagrus*). *Aquaculture Research*, 36(15), 1517-1525, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01374.x>.
- da Silva, G.D.P. and Hesselberg, T. (2020). A review of the use of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: *Stratiomyidae*), to compost organic waste in tropical regions. *Neotropical Entomology*, 49(2), 151-162, doi: <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00719-z>.
- De, D., Sandeep, K.P., Kumar, S., Raja, R.A., Mahalakshmi, P., Sivaramakrishnan, T., Ambasankar, A. and Vijayan, K.K. (2020). Effect of fish waste hydrolysate on growth, survival, health of *Penaeus vannamei* and plankton diversity in culture systems. *Aquaculture*, 524, 735240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735240>.
- Diener, S., Zurbrugg, C. and Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management and Research*, 27(6), 603-610, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X09103838>.
- Du, Z.-Y., Clouet, P., Zheng, W.-H., Degrace, P., Tian, L.-X. and Liu, Y.-J. (2006). Biochemical hepatic alterations and body lipid composition in the herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fed high-fat diets. *The British Journal of Nutrition*, 95(5), 905-915, doi: <https://doi.org/10.1079/bjn20061733>.
- Ebeneezar, S., Prabu, D.L., Chandrasekar, S., Tejpal, C.S., Madhu, K., Sayooj, P. and Vijayagopal, P. (2020). Evaluation of dietary oleoresins on the enhancement of skin coloration and growth in the marine ornamental clown fish, *Amphiprion ocellaris* (Cuvier, 1830). *Aquaculture*, 529, 735728, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735728>.
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gatlin, D.M., Barrows, F.T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T.G., Hardy, R.W., Herman, E., Hu, G., Kroghdahl, Å., Nelson, R., Overturf, K., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E.J., Stone, D., Wilson, R. and Wurtele, E. (2007). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: A review. *Aquaculture Research*, 38(6), 551-579, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x>.

- Giri, N.A., Astuti, N.W.W., Sudewi, S., Marzuqi, M. and Asih, Y.N. (2021). Fish hydrolysate supplemented diet improved feed efficiency and growth of coral trout (*Plectropomus leopardus*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 890, 012024, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/890/1/012024>.
- Gouveia, L., Rema, P., Pereira, O. and Empis, J. (2003). Colouring ornamental fish (*Cyprinus carpio* and *Carassius auratus*) with microalgal biomass: Colouring ornamental fish. *Aquaculture Nutrition*, 9(2), 123-129, doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2003.00233.x>.
- Harpaz, S., Hakim, Y., Slosman, T. and Eroldogan, O.T. (2005). Effects of adding salt to the diet of Asian seabass (*Lates calcarifer*) reared in fresh or salt water recirculating tanks, on growth and brush border enzyme activity. *Aquaculture*, 248(1-4), 315-324, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.03.007>.
- Kari, Z.A., Téllez-Isaías, G., Hamid, N.K.A., Rusli, N.D., Mat, K., Sukri, S.A.M., Kabir, M.A., Ishak, A.R., Dom, N.C., Abdel-Warith, A.-W.A., Younis, E.M., Khoo, M.I., Abdullah, F., Shahjahan, M., Rohani, M.F., Davies, S.J. and Wei, L.S. (2023). Effect of fish meal substitution with black soldier fly (*Hermetia illucens*) on growth performance, feed stability, blood biochemistry, and liver and gut morphology of Siamese fighting fish (*Betta splendens*). *Aquaculture Nutrition*, 2023(1), 6676953, doi: <https://doi.org/10.1155/2023/6676953>.
- Khieokhajonkhet, A., Uanlam, P., Ruttarattanamongkol, K., Aeksiri, N., Tatsapong, P. and Kaneko, G. (2022). Replacement of fish meal by black soldier fly larvae meal in diet for goldfish *Carassius auratus*: Growth performance, hematology, histology, total carotenoids, and coloration. *Aquaculture*, 561, 738618, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738618>.
- Kroeckel, S., Harjes, A.-G.E., Roth, I., Katz, H., Wuertz, S., Susenbeth, A. and Schulz, C. (2012). When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute - Growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture*, 364-365, 345-352, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.041>.
- Kuo, I.-P., Liu, C.-S., Yang, S.-D., Liang, S.-H., Hu, Y.-F. and Nan, F.-H. (2022). Effects of replacing fishmeal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* Linnaeus) larvae meal in Japanese eel (*Anguilla japonica*) diet on growth performance, fillet texture, serum biochemical parameters, and intestinal histomorphology. *Aquaculture Nutrition*, 2022(1), 866142, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/1866142>.

- Li, S., Ji, H., Zhang, B., Zhou, J. and Yu, H. (2017). Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure. *Aquaculture*, 477, 62-70, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.015>.
- Madende, M. and Hayes, M. (2020). Fish by-product use as biostimulants: An overview of the current state of the art, including relevant legislation and regulations within the EU and USA. *Molecules*, 25(5), 1122, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25051122>.
- Makkar, H.P.S., Tran, G., Heuzé, V. and Ankers, P. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>.
- Newton, G.L., Booram, C.V., Barker, R.W. and Hale, O.M. (1977). Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *Journal of Animal Science*, 44(3), 395-400, doi: <https://doi.org/10.2527/jas1977.443395x>.
- Pandey, P.K. and Mandal, S.C. (2017). Present status, challenges and scope of ornamental fish trade in India. In *Conference: Aqua Aquaria India 2017* (pp. 1-10). Mangalore: Marine Products Export Development Authority.
- Renna, M., Schiavone, A., Gai, F., Dabbou, S., Lussiana, C., Malfatto, V., Prearo, M., Capucchio, M.T., Biasato, I., Biasibetti, E., De Marco, M., Brugiapaglia, A., Zoccarato, I. and Gasco, L. (2017). Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8, 1-13, doi: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0191-3>.
- Saengsitthisak, B., Chaisri, W., Punyapornwithaya, V., Mektrirat, R., Klayraung, S., Bernard, J.K. and Pikulkaew, S. (2020). Occurrence and antimicrobial susceptibility profiles of multidrug-resistant aeromonads isolated from freshwater ornamental fish in Chiang Mai province. *Pathogens*, 9(11), 973, doi: <https://doi.org/10.3390/pathogens9110973>.
- Secchi, G., Bovera, F., Nizza, S., Baronti, N., Gasco, L., Conte, G., Serra, A., Bonelli, A. and Parisi, G. (2018). Quality of eggs from Lohmann brown classic laying hens fed black soldier fly meal as substitute for soya bean. *Animal*, 12(10), 2191-2197, doi: <https://doi.org/10.1017/S1751731117003603>.
- Tacon, A.G.J. and Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture*, 285(1-4), 146-158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015>.

- Tippayadara, N., Dawood, M.A.O., Krutmuang, P., Hoseinifar, S.H., Van Doan, H. and Paolucci, M. (2021). Replacement of fish meal by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal: Effects on growth, haematology, and skin mucus immunity of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Animals*, 11(1), 193, doi: <https://doi.org/10.3390/ani11010193>.
- Tocher, D.R. (2015). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids and aquaculture in perspective. *Aquaculture*, 449, 94-107, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.01.010>.
- Tschirner, M. and Simon, A. (2015). Influence of different growing substrates and processing on the nutrient composition of black soldier fly larvae destined for animal feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 249-259, doi: <https://doi.org/10.3920/JIFF2014.0008>.
- Zhao, J., Pan, J., Zhang, Z., Chen, Z., Mai, K. and Zhang, Y. (2023). Fishmeal protein replacement by defatted and full-fat black soldier fly larvae meal in juvenile turbot diet: Effects on the growth performance and intestinal microbiota. *Aquaculture Nutrition*, 2023(1), 128141, doi: <https://doi.org/10.1155/2023/8128141>.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับสำหรับผู้พิมพ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จัดทำขึ้นเพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่บทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ของคณาจารย์ บุคลากร นักศึกษา ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยฯ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรับตีพิมพ์บทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วย ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีกลุ่มเป้าหมายคือคณาจารย์ นักศึกษา และนักวิจัยทั้งในและนอกสถาบัน ทั้งนี้วารสารมีกำหนดตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ในเดือนมกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 ในเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช “ต้องไม่เคยได้รับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาเผยแพร่ในวารสารฉบับอื่น” พร้อมทั้งได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 3 ท่าน แบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review) และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ ทั้งนี้ บทความอาจถูกตัดแปลง แก้ไขคำ สำนวน รูปแบบการอ้างอิง รูปแบบการนำเสนอ และอื่น ๆ (ซึ่งไม่เกี่ยวกับเนื้อหาหรือสาระสำคัญ) ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร และผู้เขียนต้องรับผิดชอบในเนื้อหาของบทความ โดยกองบรรณาธิการวารสารวิชา และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องรับผิดชอบใด ๆ

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ

- พิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้
- การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์และการเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ควรหลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษปนกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีคำแปลหรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนปนภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ
- สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้านการใช้ภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาเป็นเบื้องต้นก่อน
- ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 20 หน้า รวมตาราง ภาพและเอกสารอ้างอิง ควรระบุเลขหน้าให้ชัดเจนและจัดให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันทั้งฉบับ

2. รายละเอียดตัวอักษรและรูปแบบการพิมพ์

- จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ขนาดของต้นฉบับใช้กระดาษขนาด Executive (18.41 × 26.67 เซนติเมตร)
- ตั้งค่าน้ำกระดาษสำหรับการพิมพ์

ด้านบน 2.5 เซนติเมตร	ด้านล่าง 2.5 เซนติเมตร
ด้านซ้าย 2.3 เซนติเมตร	ด้านขวา 2.5 เซนติเมตร
- พิมพ์คอลัมน์เดียวกระจายเต็มบรรทัด
- ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดตัวอักษร 15

3. ส่วนประกอบในบทความ

3.1 บทความวิจัย (research article) เป็นบทความที่เป็นผลงานต่อเนื่อง สกัดมาจากงานวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้วซึ่งผู้เขียนได้ดำเนินการด้วยตนเอง ประมวลสรุปกระบวนการวิจัยให้มีความกระชับและสั้น

3.1.1 ส่วนประกอบตอนต้น

➤ ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้น กระชับรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป

➤ ชื่อผู้เขียนบทความ (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก (corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมลสำหรับติดต่อ (e-mail: address)

➤ บทคัดย่อ (abstract) ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ความยาวไม่เกินอย่างละ 300 คำ บทคัดย่อที่เขียนควรสั้น ตรงประเด็น และให้สาระสำคัญเท่านั้น โดยเรียงลำดับบทคัดย่อภาษาไทยก่อนตามด้วยบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

➤ คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการวิจัย ประเด็นที่วิจัย ผลการวิจัย การใช้ประโยชน์หรือสถานที่ที่ทำวิจัย คำสำคัญนี้ให้เขียนทั้งในภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ในตอนท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษาอย่างละไม่เกิน 5 คำ

3.1.2 เนื้อหาในบทความวิจัย ให้มีองค์ประกอบดังนี้

➤ บทนำ (introduction) อธิบายถึงที่มา ความสำคัญของปัญหา และเหตุผลที่นำไปสู่การศึกษาวิจัย ให้ข้อมูลทางวิชาการที่มีการตรวจเอกสาร (literature review) โดยระบุถึงแหล่งที่มาของข้อมูล (อ้างอิง) และจุดมุ่งหมายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งวัตถุประสงค์ของการวิจัย

➤ วิธีดำเนินการวิจัย (research methods) อธิบายกระบวนการดำเนินการวิจัย โดยบอกรายละเอียดวัสดุ วิธีการศึกษา สิ่งนำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา อธิบายแบบแผนการวิจัย การสุ่มตัวอย่าง วิธีการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

➤ ผลการวิจัย (results) รายงานผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็นโดยยึดแนวทางตามวัตถุประสงค์เป็นหลัก ควรอธิบายผลการวิจัยด้วยคำบรรยายเป็นหลัก แต่ถ้ามีตัวเลขหรือตัวแปรมากควรนำเสนอเป็นภาพและตาราง แทรกในเนื้อหา พร้อมอธิบายผลการวิจัยให้ได้สาระครบถ้วน

➤ การอภิปรายผลการวิจัย (discussion) เป็นการชี้แจงผลการวิจัยว่าตรงกับวัตถุประสงค์หรือสมมติฐานของการวิจัย สอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่มีอยู่ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และให้จบด้วยข้อเสนอแนะที่จะนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

➤ สรุปผลการวิจัย (conclusion) สรุปผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็น

➤ ข้อเสนอแนะ (suggestion) (ถ้ามี)

➤ กิตติกรรมประกาศ (acknowledgements) ให้ระบุว่าจะงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนหรือความช่วยเหลือจากองค์กรใด และบุคคลใดบ้าง

➤ เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิจัยอย่างครบถ้วน โดยระบุรายละเอียดและใช้รูปแบบการเขียนที่ถูกต้องครบถ้วน (ตามข้อ 4) จัดเรียงลำดับตามตัวอักษร โดยเรียงเอกสารภาษาไทยก่อนและตามด้วยเอกสารภาษาอังกฤษ

3.2 บทความทางวิชาการ (academic article) เป็นบทความที่ผู้เขียนได้เรียบเรียงโดยศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร งานแปล และผลงานจากประสบการณ์ของผู้เขียนหรือได้รับการถ่ายทอดจากผู้อื่น มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ องค์กรความรู้ การเสนอความคิดเห็นที่มีคุณค่า และเป็นประโยชน์ทางวิชาการของสาขาต่าง ๆ

3.2.1 ส่วนประกอบตอนต้น

➤ ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้นกะทัดรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป

➤ ชื่อผู้เขียน (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก (corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมลสำหรับติดต่อ (e-mail: address)

➤ สาระสังเขป (summary) เป็นการย่อเนื้อความของบทความทั้งเรื่องให้สั้นได้เนื้อหาสาระครบถ้วน

➤ คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการ สิ่งที่ศึกษา ผลการศึกษา สาขา การใช้ประโยชน์และสถานที่ คำสำคัญให้เขียนทั้งคำสำคัญภาษาไทย และภาษาอังกฤษแต่ละชุดไม่เกิน 5 คำ

3.2.2 เนื้อหา (main text) ในบทความทางวิชาการมีองค์ประกอบดังนี้

- บทนำ (introduction) กล่าวถึงความน่าสนใจของเรื่องที่น่าสนใจก่อนเข้าสู่เนื้อหา
- เนื้อความ (content) ควรนำเสนอพัฒนาการของเรื่องได้อย่างน่าสนใจ และเนื้อเรื่องมีเนื้อหาใหม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน
- สรุป (conclusion) เป็นการย่อเฉพาะข้อมูลจากเนื้อความให้สั้นได้เนื้อหาสาระของเนื้อความครบถ้วน
- เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิชาการอย่างครบถ้วนรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงให้จัดทำตามที่ระบุไว้ในข้อ 4 (เอกสารอ้างอิง)

3.3 ตารางและภาพประกอบ ให้จัดแทรกไว้ในเนื้อเรื่องโดยคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็นเท่านั้น โดยเนื้อหาและคำอธิบายในตารางและภาพสามารถใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้น

- ตาราง เมื่อวางรูปตารางข้อมูลเรียบร้อยแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ด้านบนของตารางด้วยข้อความที่เป็น “ตารางที่... (เว้น 1 บรรทัด และตามด้วยชื่อตารางหรือคำอธิบายสั้น ๆ)” ส่วน “ที่มา” ของตาราง (ถ้ามี) ให้อยู่ด้านล่างของตาราง “ที่มา: ... (เว้น 1 บรรทัดและตามด้วยอ้างอิง” (ชื่อ, ปี) ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 จำนวนฟัน เส้นผ่านศูนย์กลาง และความเร็รรอบของจานโซ่

จานโซ่	จำนวนฟัน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเร็รรอบ (รอบต่อนาที)
ตัวที่ 1 ติดกับมอเตอร์	20	59	600
ตัวที่ 2 รับกำลังจากมอเตอร์	14	70	700
ตัวที่ 3 ต่อจากมอเตอร์	30	85	800

ที่มา: จารุณี (2559)

- ภาพประกอบ จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ เป็นภาพที่ใช้ประกอบเนื้อหา
เมื่อจัดภาพเสร็จแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ได้ภาพด้วยข้อความที่เป็น “ภาพที่.. (เว้น 1 บรรทัด และตาม
ด้วยชื่อภาพหรือคำอธิบายภาพประกอบสั้น ๆ)” และบรรทัดที่ถัดลงมาคือ “ที่มา:...” ใช้รูปแบบ
เดียวกับตารางทุกประการ ดังตัวอย่าง

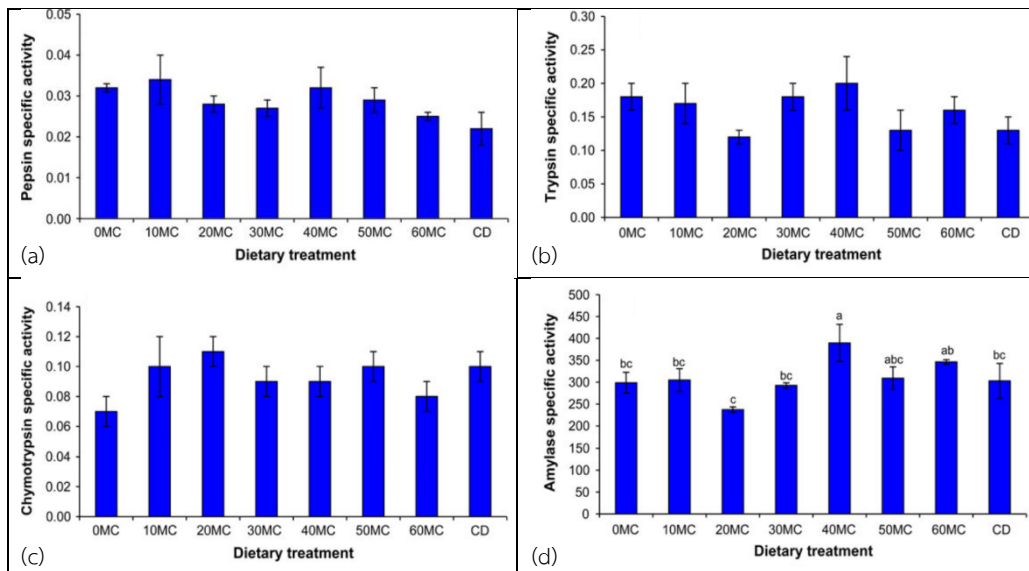


Figure 1 The specific activities (U/mg protein) of pepsin (a), trypsin (b), chymotrypsin (c) and amylase (d) in giant freshwater prawns subjected to various dietary replacements of protein from fish meal with mackerel condensate (MC). The data are expressed as mean $\pm$ SEM ($n = 3$). Different superscripts indicate significant differences between groups ($p < 0.05$). CD, commercial diet.

Source: Wattanakul *et al.* (2017)

ตารางสรุปรูปแบบการพิมพ์ส่วนประกอบของบทความ

ส่วนประกอบ ของบทความ	ลักษณะ ของตัวอักษร	ขนาด ของตัวอักษร	รูปแบบ การจัดหน้าบทความ
ชื่อเรื่อง			
1) ภาษาไทย	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
2) ภาษาอังกฤษ	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
ชื่อผู้เขียนบทความ	หนา	15 pt.	ชิดขวา
บทคัดย่อ			
1) ภาษาไทย	ปกติ	15 pt.	
2) ภาษาอังกฤษ	ปกติ	15 pt.	
คำสำคัญ	หัวข้อตัวหนา และคำสำคัญปกติ	15 pt.	ชิดซ้าย
เชิงอรรถ	ปกติ	13 pt.	ชิดซ้าย
หัวข้อหลัก	หนา	15 pt.	ชิดซ้าย (ไม่มีตัวเลขกำกับ)
หัวข้อย่อย	หนา	15 pt.	1. ชิดซ้าย (1.5 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1 ชิดซ้าย (2 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1.1 ชิดซ้าย (2.75 ซม.)
เนื้อหา	ปกติ	15 pt.	
ตาราง	ปกติ	15 pt.*	
หมายเหตุ	ปกติ	(*ขึ้นอยู่กับ	
ที่มา	ปกติ	ข้อมูล)	

4. การอ้างอิง (References)

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชใช้รูปแบบการอ้างอิงที่ดัดแปลงมาจากสมาคมจิตวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Psychological Association: APA) ดังนี้

4.1 การอิงในเนื้อหา (in-text citation) ใช้การอ้างอิงแบบ “นาม-ปี” ทั้งนี้ให้ใส่ชื่อผู้แต่ง และปีที่พิมพ์ เช่นเดียวกับการอ้างอิงท้ายบทความ

4.1.1 การเขียนอ้างอิงก่อนเนื้อหา

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: จิรวัฒน์/(2554) ข้อความ.....

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: Tomson/(2014) ข้อความ.....

4.1.2 การเขียนเนื้อหาก่อนการอ้างอิง

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ข้อความ..... (จิรวัฒน์,/2554)

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ข้อความ..... (Tomson,/2014)

กรณีมีผู้แต่งคนเดียว

- 1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อ/(ปี พ.ศ.)
- 2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุล/(ปี ค.ศ.)

กรณีมีผู้แต่ง 2 คน

- 1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และชื่อคนที่ 2/(ปี พ.ศ.)
- 2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/and/ชื่อสกุลคนที่ 2/(ปี ค.ศ.)

กรณีมีผู้แต่งมีตั้งแต่ 3 คนขึ้นไป

- 1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และคณะ/(ปี พ.ศ.)
- 2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/*et al.*/(ปี ค.ศ.)

4.2 การอ้างอิงท้ายบทความ (reference section)

หนังสือที่ตีพิมพ์เป็นรูปเล่ม (print version)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อหนังสือ/(ครั้งที่พิมพ์)/สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง กรณีตีพิมพ์ครั้งแรก (ไม่ต้องใส่ครั้งที่พิมพ์) สรเมธี วชิรปราการ. (2551). <i>เปิดชีวิตเทวดานางฟ้าไขปริศนาแดนสวรรค์</i>. นนทบุรี: สมาร์ทบุ๊ก. Almond, G.A. and Powell, B.G. (1976). <i>Comparative political today</i>. Boston: Little Brown and Company. กรณีตีพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป เจือจันทร์ จงสถิต และรุ่งเรือง สุชาติพิทย์. (2550). <i>การสังเคราะห์งานวิจัยคุณลักษณะและกระบวนการปลูกฝังจริยธรรมของประเทศต่าง ๆ</i>. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ชุมชนมนุษยธรรมการเกษตรแห่งประเทศไทย. Carpenter, J.W., Mashima, T.Y. and Rupiper, D.J. (2001). <i>Exotic animal formulary</i>. (2nd ed). Philadelphia: W.B. Saunders Company.
หนังสือที่ออนไลน์ (electronic book)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่ออนไลน์)/ชื่อหนังสือ/สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี/จาก:/http:..... .
The World Society for the Protection of Animals. (2013). <i>The Cayman turtle farm: A continued case for change</i> . Retrieved 10 July 2017, from: https://d31j74p4lpxrfpcloudfront.net/sites/default/files/us_files/turtle_a_continued_case_for_change_report.pdf .

วารสาร (journal)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อบทความ/ชื่อวารสาร/ปีที่หรือเล่มที่ (ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย หรือเลขประจำบทความ, doi:/http://doi.org/..... .
ตัวอย่าง สมรักษ์ รอดเจริญ และการณ ทองประจักษ์. (2559). สภาวะการเลี้ยงและองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (<i>Nostoc commune</i> TISTR 8870) ที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. <i>วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย</i>, 8(2), 219-229. Palzzo, A.J., Cory, T.J. and Hardy, S.E. (2003). Root growth and metal uptake in four grasses grown on Zn-contaminated soil. <i>Journal of Environmental Quality</i>, 32(3), 834-840. Varzakas, T. and Antoniadou, M. (2024). A holistic approach for ethics and sustainability in the food chain: The gateway to oral and systemic health. <i>Foods</i>, 13(8), 1224, doi: https://doi.org/10.3390/foods13081224. Whan-air, W., Thongprajukaew, K., Salaeharae, T. and Yoonram, K. (2018). Identification of wild and farmed broadhead catfish (<i>Clarias macrocephalus</i> Günther, 1864) based on morphometry, digestive indexes and flesh quality. <i>Journal of Oceanology and Limnology</i>, doi: https://doi.org/10.1007/s00343-018-7205-7.
นิตยสารหรือหนังสือพิมพ์
ชื่อ/ชื่อสกุล/(วัน/เดือน/ปี)/ชื่อบทความ/ชื่อนิตยสารหรือหนังสือพิมพ์/ปีที่/หน้า.
ตัวอย่าง มาลินี ป้องกัน. (3 กรกฎาคม 2560). ลงทะเบียนคนจน. <i>มติชน</i>, 50, หน้า 12.
บทหนึ่งในหนังสือ (book chapter)
ชื่อ/ชื่อสกุลผู้เขียนบท/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อบทหรือตอน./ใน/ชื่อ/ชื่อสกุลบรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ,/ หน้าแรก-หน้าสุดท้ายของบท./สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง มาลินนท์ วุฒิจักร. (2560). สาหร่ายพวงองุ่น. ใน บัณฑิต คิตติ. <i>เกษตรหน้าใหม่</i>, หน้า 100-110. กรุงเทพฯ: อุดมศิลป์. Zambonino-Infante, J., Gisbert, E., Sarasquete, C., Navarro, I., Gutiérrez, J. and Cahu, C.I. (2009). Ontogeny and physiology of the digestive system of the marine fish larvae. In Cyrino, J.E.O., Bureau, D. and Kapoor, B.G. (Eds.). <i>Feeding and digestive function of fish</i>, pp. 277-344. Enfield: Science Publishers, Inc.

วิทยานิพนธ์
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อวิทยานิพนธ์/ระดับวิทยานิพนธ์/ชื่อมหาวิทยาลัย/เมืองที่ตั้งมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จงลักษณ์ จีมนับใจ. (2550). สมรรถนะแห่งตนต่อการเฝ้าระวังโรคความดันโลหิตสูงของอาสาสมัครสาธารณสุขอำเภอห้วยน้ำเย็น จังหวัดน่าน. วิทยานิพนธ์พยาบาลศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. Mirera, D.O. (2013). Capture-based mud crab (<i>Scylla serrata</i>) aquaculture and artisanal fishery in East Africa-Practical and ecological perspectives. Ph.D. thesis in Environmental Science. Linnaeus University, Kalmar.
เว็บไซต์ (website)
ชื่อผู้จัดทำ/(ปีที่ออนไลน์)/ชื่อเรื่อง/สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี/จาก:/http:..... .
ตัวอย่าง อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์. (2542). ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2542, จาก: http://158.108.200.11/scil/009hom~1/009421/chap1.html. Adkins, J. (2016). Marine scientist devotes career to reversing trend of by catch. Retrieved 1 July 2018, from: https://phys.org/news/2016-03-marine-scientist-devotes-career-reversing.html.
รายงานการประชุม
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อเรื่อง/ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา/เมืองที่พิมพ์.
ตัวอย่าง สุรยุทธ์ แฉ่งเกิด. (2559). ความมั่นคงทางอาหารของชุมชนบ้านบางปรก. การประชุมวิชาการความมั่นคงทางอาหารแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.
รายงานการวิจัย
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อเรื่อง/รายงานวิจัย/ชื่อมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จันทิมา ชั่งสิริพร พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และพญกระยา พงศ์ยี่หล้า. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บทหนึ่งในหนังสือการประชุม (proceeding) และเอกสารการสัมมนา
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความหรือบท./ใน/ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา/(หน้าแรก-หน้าสุดท้าย)./เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่จัดทำ.
ตัวอย่าง กรวรรณ มากสุข. (2555). วากรรมความงามของเต็กมัธยมศึกษาแห่งหนึ่งในจังหวัดนครศรีธรรมราช. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3 (หน้า 22-35). นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
บทคัดย่อในการประชุมวิชาการ (abstract in conference)
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ในบทคัดย่อ/ชื่อการประชุม/(หน้า)./เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่จัดทำ.
Kovitvadhi, A., Chandang, P., Luapan, J., Sriyaphai, P., Buahom, R., Cham-iam, T., Leelehapongsathon, K., Tirawattanawanich, C. and Thongprajukaew, K. (2018). Screening three cricket species (<i>Gryllus bimaculatus</i>, <i>Acheta domestica</i> and <i>Modicogryllus confirmata</i>) for broiler diets by <i>in vitro</i> digestibility techniques. In <i>Abstract of the 6th Mediterranean Poultry Summit</i> (pp. 62). Torino: The Mediterranean Poultry Network of the World's Poultry Science Association.



วารสาร วิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

วารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ISSN 3027-737X (Online)

WICHCHA
NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY
JOURNAL

