



# วารสารวิชาการ ชายนีเทคโนโลยี

มรภ.ภูเก็ต

ISSN 2822 - 1044 (Online)  
ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569

**PKRU**

**SCi**



**TECH**  
**JOURNAL**



วารสารวิชาการสายันเทคโนโลยี มรภ.ภูเก็ต  
ISSN 2822-1044 (Online)



## บรรณาธิการ

ผศ.ดร.สายธาร ทองพร้อม

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

## กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล

ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

ศาสตราจารย์ ดร.ศุภมิตร จิตตะยโสธร

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ วัฒนเส็ก

รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี อีสระไกรศีล

รองศาสตราจารย์ ดร.วรัญญู ศรีเดช

รองศาสตราจารย์ ดร.อัมพรพรรณ อีรานูตร

รองศาสตราจารย์ ดร.ชฎานิส ลือวานิช

รองศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วงศ์ณะบุรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ผุสดี พรหม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา รัตนบุรี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต (PKRU SciTech Journal) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิบทความละ 3 ท่าน จำนวน 7 บทความ ประกอบไปด้วย บทความที่เกี่ยวข้องกับความรู้ทางด้านเกษตร จำนวน 2 บทความ ได้แก่ ผลของสารสกัดเปลือกมังคุดต่อการเสริมความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศคุณภาพต่ำ และบทความเรื่องการพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจาก *Bacillus subtilis* โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและการประเมินประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งทางการเกษตร บทความทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและปัญญาประดิษฐ์ จำนวน 3 บทความ ได้แก่ ระบบสั่งอาหารผ่านคิวอาร์โค้ดสำหรับร้านขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและลดต้นทุนของผู้ประกอบการรายย่อย บทความเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับเครื่องมือผ่าตัดโดยใช้ Faster R-CNN เพื่อพัฒนาและออกแบบระบบตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ และบทความเรื่องการยกระดับโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมด้วยเทคโนโลยีไอโอที กรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ พัฒนาระบบการผลิตให้มีคุณภาพและนำไปสู่การเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในท้องถิ่น บทความทางด้านสิ่งแวดล้อม จำนวน 1 บทความ คือ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดิน จังหวัดภูเก็ต เป็นฐานข้อมูลทางวิชาการในการสนับสนุนการวางแผนและการจัดการสิ่งแวดล้อมในพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ และบทความทางด้านเคมี จำนวน 1 บทความ คือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดูด้วยแสงซิงก์ออกไซด์ไฮดรอกซีอะพาไทต์และซิงก์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว เพื่อใช้ประโยชน์จากชีวมวลกระดูกปลาและการสังเคราะห์สารแบบเคมีสีเขียว โดยทั้ง 7 บทความนี้ มีความหลากหลายในด้านวิชาการ ซึ่งทางกองบรรณาธิการคาดหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านและส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ในวงวิชาการต่อไป

วารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ. ภูเก็ต ได้รับความร่วมมือจากทั้งผู้ประเมินบทความ (peer review) และผู้เขียนบทความในการแก้ไขจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

กองบรรณาธิการใคร่ขอเชิญชวนท่านผู้อ่านที่สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต ทั้งนี้ สามารถส่งต้นฉบับบทความผ่านในหน้าเว็บไซต์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech> เพื่อเป็นการเผยแพร่ความรู้และพัฒนาสังคม อันจะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านและผู้สนใจต่อไป



(ผศ.ดร.สายธาร ทองพร้อม)

บรรณาธิการ

## สารบัญ

|                                                                                                                                                                                                                                             |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ผลของสารสกัดเปลือกมังคุดต่อการเสริมความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศคุณภาพต่ำ<br>ชนกเนตร ชัยวิชา*, ไพฑูรย์ ทองสุข, ชัยชนะรินทร์ ทับมะเรียง และ สุนิสา เยาวสกุลมาศ                                                                          | 1-9   |
| ระบบส่งอาหารผ่านคิวอาร์โค้ดสำหรับร้านขนาดเล็ก<br>อนุวัฒน์ อินทร์ตัน และ อรรถพล ปิลไธย์*                                                                                                                                                     | 10-21 |
| การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดิน จังหวัดภูเก็ต<br>อรสา นานบ้าน*, สุภารัตน์ ไสแสง, อัครมน ลิมสกุล, ดนัย ทิพย์มณี, ธนกร จิรวงศ์เรืองกุล และ ธนิตา อาธิรบ                                                     | 22-35 |
| การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับเครื่องมือผ่าตัดโดยใช้ Faster R-CNN<br>โพธิ์ สิ้นชู*, ชลัย์รัตน์ อธิคุณหะวงค์, สุวพันธ์ บัวรอด และ ยุทธนา ปิติธีรภาพ                                                                                         | 36-50 |
| การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซิงก์ออกไซด์ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และซิงก์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว<br>พรพนิต เกกينة, อัมมณีญา มะยิดา, เนตรนภิส อ่องสุวรรณ และ เสาวภา โชติสุวรรณ* | 51-66 |
| การพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจาก <i>Bacillus subtilis</i> โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและการประเมินประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด<br>สุสนา ตีมุง*, อัญรินทร์ ภูมิสุข, ชูโฮมิน เจ๊ะมะลี และ นริศรา ดารากัย                           | 67-81 |
| การยกระดับโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมด้วยเทคโนโลยีไอโอที: กรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ<br>วรภรณ์ ทุมชาติ, ศุภวุฒิ ผากา*, ประสงค์ หน่อแก้ว และ วราคม วงศ์ชัย                                                                | 82-94 |

## ผลของสารสกัดเปลือกมังคุดต่อการเสริมความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ มะเขือเทศคุณภาพต่ำ

### Effects of Mangosteen Peel Extract on the Vigor of Low-Quality Tomato Seeds

ชนกเนตร ชัยวิชา\*, ไพฑูรย์ ทองสุข, ชัยนรินทร์ ทับมะเรง และ สุนิสา เยาวสกุณมาศ  
Chanoknet Chaiwicha\*, Phaitoon Thongsuk, Chainarin Thabmareng &  
Sunisa Yaowasakunmat

หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

Bachelor of Education Program in Agriculture, Faculty of Agriculture and Agricultural Industry,  
Surindra Rajabhat University, Surin 32000

Submitted 24/10/2025 ; Revised 14/01/2026 ; Accepted 08/02/2026

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมความแข็งแรงให้กับเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L. พันธุ์ ARQ 2023) คุณภาพต่ำ ด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* L.) ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติในกลุ่มแซนโทนส์ (xanthones) ได้แก่  $\alpha$ -mangostin และ  $\gamma$ -mangostin การทดลองใช้เทคนิคการเตรียมการงอกแบบ osmopriming โดยแช่เมล็ดพันธุ์ที่มีความงอกเริ่มต้น 60% ในสารสกัดเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% ในน้ำ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในสภาพห้องปฏิบัติการและเรือนทดลองพบว่า เมล็ดที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดทุกระดับความเข้มข้นมีเปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีการงอกสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสารสกัดที่ความเข้มข้น 3% ให้ค่าความงอกสูงสุด (88.33%) และดัชนีการงอกสูงสุด (15.04 ต้น/วัน) ในขณะที่การใช้สารสกัดที่ 2% ส่งผลให้ความยาวรากเฉลี่ยสูงสุด (5.14 เซนติเมตร) และความยาวต้นกล้าในเรือนทดลองสูงสุด (8.32 เซนติเมตร) เปลือกมังคุดมีรายงานว่าประกอบด้วยสารพฤกษเคมีหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการลดความเสียหายของเซลล์จากอนุมูลอิสระ ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มเติมเพื่อยืนยันสมมติฐานดังกล่าว ซึ่งการใช้สารสกัดเปลือกมังคุดในความเข้มข้น 2-3% จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเสริมความแข็งแรงและยกระดับคุณภาพของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศคุณภาพต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** การเตรียมการงอก การเสริมความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ สารสกัดจากเปลือกมังคุด  
สารต้านอนุมูลอิสระ

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: Chanoknet.c@sru.ac.th

## Abstract

This research aimed to investigate the effect of antioxidant-rich mangosteen peel extract (*Garcinia mangostana* L.) on the invigoration of low-quality tomato seeds (*Solanum lycopersicum* L., cv. ARQ 2023). The study applied an osmopriming technique, in which tomato seeds with an initial germination rate of 60% were soaked in mangosteen peel extract solutions at concentrations of 1, 2, and 3% for 48 hours at 25 °C. The quality of the treated seeds was evaluated under both laboratory and greenhouse conditions. The results revealed that all concentrations of mangosteen peel extract significantly improved germination percentage and germination index compared with the control. Seeds primed with 3% extract showed the highest germination percentage (88.33%) and germination index (15.04 plants/day), while 2% extract resulted in the greatest root length (5.14 cm) and shoot length under greenhouse conditions (8.32 cm). The pericarp of mangosteen has been reported to contain various phytochemical compounds associated with antioxidant activity, which may be related to the reduction of cellular damage caused by free radicals. However, further evaluation of antioxidant activity is required to substantiate this hypothesis. Priming with 2–3% mangosteen peel extract is therefore a promising natural biopriming strategy for enhancing the vigor and quality of low-quality tomato seeds.

**Keywords:** seed priming, seed invigoration, mangosteen peel extract, antioxidant

## บทนำ

มังคุด (*Garcinia mangostana* L.) ได้รับการยกย่องว่าเป็น “ราชินีแห่งผลไม้เมืองร้อน” ไม่เพียงเพราะรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ เปลือกมังคุดยังอุดมด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีคุณค่าทางเภสัชวิทยาสูง โดยเฉพาะกลุ่มแซนโทน (xanthones) เช่น  $\alpha$ -mangostin,  $\gamma$ -mangostin และ garcinone E ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และต้านจุลชีพ (antimicrobial) ที่โดดเด่น [1, 2] มีงานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าการสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระและลดความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์พืช ช่วยให้เซลล์คงสภาพสมบูรณ์และทนต่อสภาวะความเครียดจากสิ่งแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น [3, 4] ในด้านเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ ปัจจุบันหนึ่งในความท้าทายสำคัญของภาคเกษตรกรรมคือปัญหาเมล็ดพันธุ์คุณภาพต่ำซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต เก็บเกี่ยว และเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เมล็ดสูญเสียความมีชีวิต อัตราการงอกลดลง และต้นกล้ามีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอทำให้ผลผลิตลดลงกว่า 20–40% โดยเฉพาะในมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L.) ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีพื้นที่เพาะปลูกกว่า 5 ล้านเฮกตาร์ทั่วโลก ให้ผลผลิตรวมมากกว่า 180 ล้านตันต่อปี [5] และมีมูลค่าทางการตลาดหลายหมื่นล้านดอลลาร์สหรัฐ ความต้องการเมล็ดพันธุ์คุณภาพสูงจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เทคนิคการเตรียมการงอกเมล็ดก่อนเพาะ (seed priming) หรือการเสริมความแข็งแรงของเมล็ด (seed invigoration) เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยเมล็ดพันธุ์ยุคใหม่ เนื่องจากสามารถช่วยกระตุ้นกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เกี่ยวข้องกับการงอก ลดความเสียหายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative stress) และเพิ่มความสม่ำเสมอในการงอกและความแข็งแรงของต้นกล้า [6] การใช้สารต้านอนุมูลอิสระในการเตรียมเมล็ดจึงถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาและคงสภาพความมีชีวิตของเมล็ดพันธุ์

ดังนั้น การประยุกต์ใช้สารสกัดเปลือกมังคุดซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติในกระบวนการเตรียมเมล็ดมะเขือเทศ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยา lipid peroxidation โดยมี malondialdehyde (MDA) เป็นดัชนีสำคัญ และช่วยให้เมล็ดคงความแข็งแรงได้นานขึ้น การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกมังคุดต่อการงอก ความแข็งแรงของต้นกล้า และความเสื่อมของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศคุณภาพต่ำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเมล็ดพันธุ์คุณภาพต่ำให้มีคุณภาพสูงขึ้น และเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

## วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระจากเปลือกมังคุดต่อการงอก ความแข็งแรงของต้นกล้า และการลดความเสื่อมของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมสารสกัดจากเปลือกมังคุด

เตรียมเปลือกมังคุดด้วยวิธีการกลั่นโดยการผ่านไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าไปในหม้อควบคุมหอที่บรรจุวัตถุดิบ จำนวน 30 กิโลกรัม ของพืชที่นำมากลั่นน้ำมันหอมระเหย เมื่อความร้อนจากไอน้ำกระทบกับวัตถุดิบ ไอน้ำจะนำพาน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในพืชชนิดนั้น ๆ ออกมาผ่านท่อ

เกลียวที่หล่อเลี้ยงด้วยน้ำเย็นเพื่อให้เกิดการลดอุณหภูมิและควบแน่นกลายเป็นของเหลว หลังจากนั้นของเหลวจากการควบแน่นที่ได้จะไหลผ่านท่อควบแน่นเข้าสู่หลอดแก้ว ได้น้ำมันหอมระเหยที่แยกชั้นออกจากน้ำ

## 2. การเตรียมการรอกเมล็ดพันธุ์

นำเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ที่มีค่าความงอกเริ่มต้นที่ 60% ความชื้นเมล็ด 5-6% ไปเตรียมการรอกโดยมีเมล็ดชุดควบคุม เมล็ดแช่น้ำเปล่า เมล็ดแช่น้ำสารสกัดจากเปลือกมังคุด ในอัตรา 1, 2 และ 3% ซึ่งค่าศักยภาพของสารละลายที่เข้มข้นเท่ากับ -1.5 เมกะปาสคาล เตรียมโดยนำเมล็ด จำนวน 3 กรัม แช่น้ำ 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร เทสารละลายที่เตรียมไว้ใส่ในบีกเกอร์ คนให้เมล็ดพันธุ์จมอยู่ในสารละลาย จากนั้นปิดปากบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ แช่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยมีเมล็ดที่ไม่แช่สารละลายเป็นชุดควบคุม (control) เมื่อครบกำหนดระยะเวลาในการแช่ นำเมล็ดพันธุ์ออกจากสารละลายล้างด้วยน้ำกลั่นโดยการล้างผ่านน้ำไหลประมาณ 2 นาที จากนั้นนำเมล็ดมาลดความชื้นโดยใช้เครื่องลดความชื้นที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จนระดับความชื้นของเมล็ดพันธุ์ลดลงใกล้เคียงกับความชื้นเริ่มต้น (5-6 %) จากนั้นนำทุกชุดการทดลองมาตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ความงอก ดัชนีการงอก ความยาวต้น ความยาวราก ของเมล็ดพันธุ์ที่เพาะในหีบปฏิบัติการและในสภาพแปลงปลูก

## 3. การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ

3.1 การตรวจสอบความงอกในสภาพห้องปฏิบัติการ: สุ่มเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมการรอก ทุกชุดการทดลองมาทดสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ในสภาพห้องปฏิบัติการ โดย top of paper (TP) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ซ้ำละ 100 เมล็ด นำไปไว้ในตู้เพาะเมล็ดพันธุ์ที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตรวจนับเมล็ดพันธุ์หลังการเพาะเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศ โดยตรวจนับครั้งแรก (first count) ที่ 5 วัน และนับครั้งสุดท้าย (final count) ที่ 14 วัน คำนวณเปอร์เซ็นต์ความงอก [7]

3.2 การตรวจสอบความงอกในสภาพเรือนทดลอง: สุ่มเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ที่ผ่านและไม่ผ่านการเตรียมการรอก ทุกชุดการทดลองมาทดสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ในสภาพเพาะกล้าขนาด 200 หลุม โดยใช้พีทมอสเป็นวัสดุเพาะ ทดลอง 3 ซ้ำ ซ้ำละ 100 เมล็ด จากนั้นนำไปไว้ในสภาพเรือนทดลองภายใต้อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส ตรวจนับหลังการเพาะ โดยตรวจนับครั้งแรกที่ 5 วัน และนับครั้งสุดท้ายที่ 14 วัน และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความงอก

3.3 ดัชนีการงอก: ตรวจนับจำนวนต้นกล้ามะเขือเทศปกติจากการนับความงอกครั้งแรกหลังเพาะ 5 วัน และวันสุดท้ายหลังเพาะ 14 วัน ของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ที่เพาะในสภาพห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาดัชนีการงอกจากสูตร [8]

$$\text{ดัชนีการงอก} = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนต้นกล้าที่งอกในแต่ละวัน}}{\text{จำนวนวันหลังเพาะ}}$$

3.4 ความยาวต้นและความยาวรากของต้นกล้า: สุ่มต้นกล้ามะเขือเทศปกติที่อายุ 14 วัน หลังเพาะ ในสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพเรือนทดลองมาประเมินความยาวต้นและความยาวราก (เซนติเมตร) ทั้งหมด 3 ซ้ำ ๆ ละ 10 ต้น โดยการตรวจสอบวัดความยาวต้นจะวัดตั้งแต่บริเวณโคนต้น จนถึงปลายยอด ส่วนความยาวรากจะวัดตั้งแต่โคนรากจนถึงปลายรากของต้นกล้า

#### 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ผลข้อมูลตามแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลองการเตรียมการงอกโดยวิธี least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 และ 0.01 โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SAS 09

#### ผลการศึกษา

จากการทดลองเตรียมการงอกเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ด้วยวิธี osmopriming เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุด ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3% พบว่า เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดทุกระดับความเข้มข้นมีเปอร์เซ็นต์การงอกและความเร็วการงอกสูงกว่าชุดควบคุม (ไม่เตรียมการงอก) และชุดน้ำเปล่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) โดยในสภาพห้องปฏิบัติการ เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดเปลือกมังคุด 3% มีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุด 88.33% และมีค่าความเร็วการงอก (germination index; GI) สูงสุด 15.04 ต้นต่อวัน ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (61.67%) และแช่น้ำเปล่า (69.33%) (ตารางที่ 1) ในขณะที่ในสภาพเรือนทดลอง เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยเปลือกมังคุดในทุกระดับความเข้มข้น (1–3%) มีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุดระหว่าง 92–94% และมีค่าดัชนีการงอกสูงกว่าเมล็ดที่ไม่เตรียมการงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในความเข้มข้น 3% ซึ่งให้ค่าความงอกและความเร็วการงอกสูงที่สุดในสภาพห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง

ตารางที่ 1 ความงอกและดัชนีการงอกของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศหลังการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

| กรรมวิธี                  | ความงอก (%)        |                    | ดัชนีการงอก (ต้น/วัน) |                     |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
|                           | ห้องปฏิบัติการ     | เรือนทดลอง         | ห้องปฏิบัติการ        | เรือนทดลอง          |
| ชุดควบคุม*                | 61.67 <sup>d</sup> | 62.67 <sup>c</sup> | 7.94 <sup>c</sup>     | 16.37 <sup>c</sup>  |
| น้ำ                       | 69.33 <sup>c</sup> | 85.33 <sup>b</sup> | 13.46 <sup>b</sup>    | 17.29 <sup>bc</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 1% | 78.67 <sup>b</sup> | 92.00 <sup>a</sup> | 13.22 <sup>b</sup>    | 18.11 <sup>ab</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 2% | 80.33 <sup>b</sup> | 92.00 <sup>a</sup> | 13.39 <sup>b</sup>    | 18.24 <sup>ab</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 3% | 88.33 <sup>a</sup> | 94.00 <sup>a</sup> | 15.04 <sup>a</sup>    | 18.91 <sup>a</sup>  |
| F-test                    | **                 | **                 | **                    | **                  |
| CV (%)                    | 3.67               | 1.86               | 3.46                  | 2.62                |

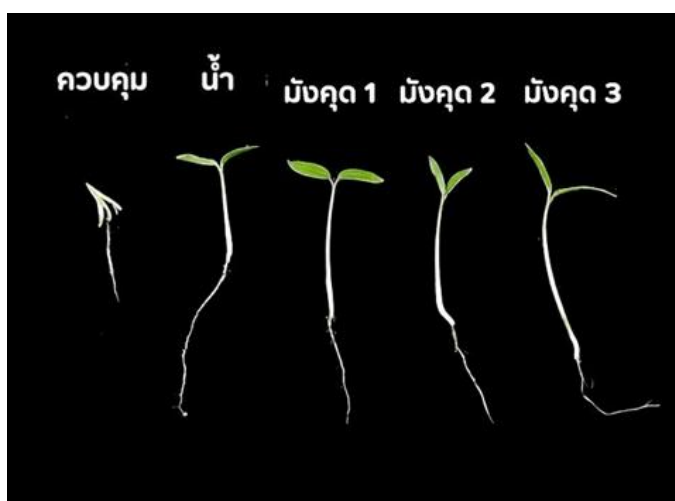
หมายเหตุ ตัวอักษร a–d ที่แตกต่างกันตามแนวนอน \*\* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p \leq 0.01$  ตามลำดับ, \* หมายถึง เมล็ดที่ไม่เตรียมการงอก

จากการเตรียมการออกเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ด้วยวิธี osmopriming โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าในสภาพห้องปฏิบัติการ เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการออกด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดที่ ความเข้มข้น 2% มีความยาวรากเฉลี่ยสูงที่สุด 5.14 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.01$ )

**ตารางที่ 2** ความยาวรากและความยาวต้น (เซนติเมตร) ของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศหลังการเตรียมการออกด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

| กรรมวิธี                  | ความยาวราก (เซนติเมตร) |                    | ความยาวต้น (เซนติเมตร) |                   |
|---------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|
|                           | ห้องปฏิบัติการ         | เรือนทดลอง         | ห้องปฏิบัติการ         | เรือนทดลอง        |
| ชุดควบคุม*                | 4.87 <sup>b</sup>      | 14.44 <sup>a</sup> | 4.87 <sup>b</sup>      | 5.60 <sup>c</sup> |
| น้ำ                       | 4.21 <sup>c</sup>      | 11.43 <sup>d</sup> | 4.21 <sup>c</sup>      | 5.45 <sup>c</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 1% | 3.37 <sup>d</sup>      | 14.66 <sup>a</sup> | 5.31 <sup>a</sup>      | 7.33 <sup>b</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 2% | 5.14 <sup>a</sup>      | 12.60 <sup>c</sup> | 4.85 <sup>b</sup>      | 8.32 <sup>a</sup> |
| สารสกัดจากเปลือกมังคุด 3% | 3.32 <sup>d</sup>      | 13.58 <sup>b</sup> | 4.88 <sup>b</sup>      | 8.31 <sup>a</sup> |
| F-test                    | **                     | **                 | **                     | **                |
| CV (%)                    | 2.0                    | 2.56               | 0.36                   | 2.86              |

หมายเหตุ ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกันตามแนวนอน \*\* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $p \leq 0.01$  ตามลำดับ, \* หมายถึง เมล็ดที่ไม่เตรียมการออก



**ภาพที่ 1** ต้นกล้าที่ผ่านการเตรียมการออกที่เพาะกล้าในห้องปฏิบัติการหลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 5 วัน

## อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาผลของการเสริมความแข็งแรงให้กับเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศคุณภาพต่ำด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุด พบว่าการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีผลทำให้อัตราการงอกสูงขึ้น สอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การเตรียมการงอก (seed priming) เป็นกระบวนการกระตุ้นให้เมล็ดเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาก่อนการงอกเต็มรูปแบบ เช่น การกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายสารอาหารสะสม (เช่น  $\alpha$ -amylase, protease) และการลดระดับสารอนุมูลอิสระภายในเซลล์เมล็ด [6, 9] ทั้งนี้เนื่องจากสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีองค์ประกอบของ สารโพลีฟีนอลและแทนนิน โดยเฉพาะกรดแทนนินซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้สามารถช่วยลดความเสียหายของเซลล์ที่เกิดจาก reactive oxygen species (ROS) ในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ด ช่วยให้เยื่อหุ้มเซลล์คงสภาพดีขึ้นและกระบวนการเมแทบอลิซึมเริ่มต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] การที่เมล็ดพันธุ์มะเขือเทศที่ผ่านการ osmopriming ด้วยเปลือกมังคุดมีเปอร์เซ็นต์การงอกและดัชนีการงอกสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากการปรับสมดุลน้ำภายในเมล็ด (hydration balance) ที่เหมาะสมในช่วงการเตรียมการงอก 48 ชั่วโมง ทำให้ระบบเอนไซม์เริ่มทำงานได้เร็วขึ้นเมื่อเข้าสู่สภาวะเพาะงอกจริงหรือสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกมังคุดอาจช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในเมล็ด เช่น รา หรือแบคทีเรีย ซึ่งมักเป็นสาเหตุของการงอกช้าในเมล็ดที่มีคุณภาพต่ำหรือคุณสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของกรดแทนนินช่วยป้องกันการเกิด lipid peroxidation ของเยื่อหุ้มเซลล์ส่งผลให้การงอกเกิดขึ้นรวดเร็วและต้นกล้ามีความแข็งแรงมากขึ้น [10]

เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดความเข้มข้น 1% ให้ความยาวยอดเฉลี่ยสูงสุดซึ่งมากกว่าชุดควบคุมและการแช่น้ำกลั่นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการใช้สารสกัดในระดับต่ำสามารถส่งเสริมการยืดตัวของยอดได้ดีในสภาพควบคุมภายในห้องปฏิบัติการ ในส่วนของ การทดสอบในสภาพเรือนทดลอง พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดที่ 1% มีความยาวรากเฉลี่ยสูงสุดใกล้เคียงกับชุดควบคุมและสูงกว่าการใช้สารสกัดที่ระดับ 2 และ 3% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดอาจส่งผลให้การยืดตัวของรากลดลงบางส่วน ซึ่งอาจเกิดจากผลของความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่สูงเกินไป ทำให้เกิดภาวะเครียดเชิงออสโมซิส (osmotic stress) หรือมีการยับยั้งกระบวนการแบ่งเซลล์บางส่วน [10] ในขณะที่ความยาวต้นในเรือนทดลองพบว่า เมล็ดที่ผ่านการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดที่ความเข้มข้น 2 และ 3% มีค่าความยาวต้นเฉลี่ยสูงสุดตามลำดับ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากชุดควบคุมและการแช่น้ำกลั่น แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดเปลือกมังคุดในการส่งเสริมการยืดตัวของต้นภายใต้สภาพแวดล้อมธรรมชาติของเรือนทดลอง เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยรวม พบว่าการเตรียมการงอกด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้น 2% มีประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งเสริมการเจริญของทั้งความยาวรากและความยาวต้น โดยเฉพาะในสภาพห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการมีสารประกอบฟีนอลิกและแทนนินในเปลือกมังคุดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระช่วยลดความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในระหว่างการงอกของเมล็ดและส่งผลให้กระบวนการเมแทบอลิซึมของเมล็ดดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [11] ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ seed priming theory ที่ระบุว่าการปรับสภาพเมล็ดด้วยสารต้านอนุมูลอิสระช่วยให้ระบบป้องกันภายในเซลล์ (antioxidant defense system) มีความสมดุลทำให้เซลล์รากและเซลล์ยอดสามารถแบ่งตัวและยืดตัวได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สารสกัดที่ความเข้มข้นสูงเกินไป (3%) พบว่าการยืดตัวของรากลดลง ซึ่งอาจอธิบายได้ด้วยแนวคิด dose-dependent effect โดยสารฟีนอลิกในปริมาณมากอาจมีผลยับยั้ง เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์หรือทำให้เกิดการเสียสมดุลของแรงดันออสโมซิสในเมล็ด [12] นอกจากนี้ ผลการทดลองในสภาพเรือนทดลองที่แตกต่างจากห้องปฏิบัติการอาจเกิดจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นและอุณหภูมิที่แปรผัน ซึ่งส่งผลต่อการคงตัวของสารออกฤทธิ์ในสารสกัด ทำให้ประสิทธิภาพของสารลดลงหรือเกิดปฏิกิริยากับอินทรีย์วัตถุในดิน โดยสรุปการเตรียมการออกของเมล็ดมะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 ด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดที่ความเข้มข้น 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีแนวโน้มให้ผลดีที่สุด ทั้งในด้านการพัฒนารากและความยาวต้นกล้า โดยเฉพาะในสภาพควบคุมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดจากธรรมชาติในการใช้เป็นสารกระตุ้นการงอก (biopriming agent) เพื่อเพิ่มคุณภาพเมล็ดพันธุ์ก่อนการเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้มีความสำคัญทั้งในเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้ทางการเกษตร เนื่องจากการเพิ่มคุณภาพเมล็ดพันธุ์ด้วยสารจากธรรมชาติสามารถช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชได้ โดยเลือกใช้วัสดุชีวภาพที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในอนาคตงานทดลองควรทดสอบฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดจากเปลือกมังคุดเพื่อให้ได้ผลที่แน่ชัดว่าสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีสารต้านอนุมูลอิสระ ที่สามารถเพิ่มความงอกของเมล็ดพันธุ์ได้

### สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคนิค osmopriming ด้วยสารสกัดเปลือกมังคุดเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการยกระดับคุณภาพของเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศพันธุ์ ARQ 2023 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น 3% ซึ่งให้ค่าความงอกและดัชนีการงอกสูงสุดทั้งในสภาพห้องปฏิบัติการและเรือนทดลอง วิธีนี้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้สารธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณภาพเมล็ดพันธุ์ ซึ่งอาจนำไปสู่การลดการใช้สารเคมีสังเคราะห์ในการเกษตรได้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Obolskiy, D., Pischel, I., Siriwatanametanon, N., & Heinrich, M. (2009). *Garcinia mangostana* L.: A phytochemical and pharmacological review. *Phytotherapy Research*, 23(8), 1047–1065.
- [2] Pedraza-Chaverri, J., Cárdenas-Rodríguez, N., Orozco-Ibarra, M., & Pérez-Rojas, J. M. (2008). Medicinal properties of mangosteen (*Garcinia mangostana*). *Food and Chemical Toxicology*, 46(10), 3227–3239.
- [3] Tungmunthum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A., & Yangsabai, A. (2018). Flavonoids and other phenolic compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects: An overview. *Medicines*, 5(3), 93.
- [4] Chomnawang, M. T., Surassmo, S., Nukoolkarn, V. S., & Gritsanapan, W. (2005). Antimicrobial effects of Thai medicinal plants against acne-inducing bacteria. *Journal of ethnopharmacology*, 101(1–3), 330–333.

- [ 5] FAO. (2023). FAOSTAT: Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Foyer & Noctor.
- [6] Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2005). Pre-sowing seed treatment — A shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, 88, 223–271.
- [7] International Seed Testing Association (ISTA). (2019). International rules for seed testing 2019. Zürich: ISTA.
- [8] Association of Official Seed Analysts (AOSA). (2002). Seed vigor testing handbook. contribution No. 32 to the handbook of seed testing. USA: Association of Official Seed Analysts.
- [9] Bewley, J. D., & Black, M. (1982). Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination: Vol. 2. Viability, dormancy, and environmental control. Berlin, Heidelberg, and New York: Springer-Verlag.
- [10] Manasathien, J., & Khanema, P. (2015). Antioxidant and cytotoxic activities of mangosteen *Garcinia mangostana* pericarp extracts. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 20(4), 381–392.
- [11] Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2012). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3<sup>rd</sup> ed.). Springer.
- [12] Kang, Y. I., Park, J. M., Kim, S. H., Kang, N. J., Park, K. S., Lee, S. Y., & Jeong, B. R. (2011). Effects of root zone pH and nutrient concentration on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 34(5), 640–652.

## ระบบสั่งอาหารผ่านคิวอาร์โค้ดสำหรับร้านขนาดเล็ก QR Ordering System for Small Scale Eateries

อนุวัฒน์ อินทรรัตน์ และ อรรถพล ปิลไลย์\*  
Anuwat Intarat & Attapon Pillai\*

สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต  
Digital Technology Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

Submitted 07/11/2025 ; Revised 19/01/2026 ; Accepted 17/03/2026

### บทคัดย่อ

การวิจัยและพัฒนาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินผลเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้าน ซึ่งเป็นระบบสั่งอาหาร ณ ร้านค้าที่เปิดให้ใช้งานโดยไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ประกอบการรายย่อยเพื่อแก้ปัญหาด้านต้นทุนและความซับซ้อนของระบบจัดการร้านอาหารที่มีอยู่ในตลาด ระบบถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้สถาปัตยกรรมแบบเซิร์ฟเวอร์เลส (serverless) บนแพลตฟอร์ม Google Firebase ประกอบด้วยบริการหลัก ได้แก่ บริการเว็บโฮสติ้ง (Firebase Hosting) บริการยืนยันตัวตน (Firebase Authentication) และบริการฐานข้อมูลแบบ NoSQL บนคลาวด์ (Cloud Firestore) สำหรับฐานข้อมูลแบบเรียลไทม์ ผู้ใช้งานฝั่งลูกค้าสามารถสแกนคิวอาร์โค้ดประจำโต๊ะเพื่อดูรายการอาหาร เลือกรายการอาหารพร้อมตัวเลือกเสริมและส่งคำสั่งซื้อไปยังห้องครัวได้โดยตรง ในขณะที่ผู้ประกอบการสามารถจัดการข้อมูลร้านอาหาร รายการอาหาร และติดตามสถานะคำสั่งซื้อที่เข้ามาใหม่แบบเรียลไทม์ผ่านหน้าจอแสดงผลสำหรับห้องครัวในรูปแบบคัมบังบอร์ด (Kanban board) การประเมินความพึงพอใจโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนลิเคิร์ต 5 ระดับ (5-point Likert scale) จากกลุ่มตัวอย่างผู้ประกอบการ (n=3) และผู้รับบริการ (n=19) ซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้นพบว่าผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่มมีความพึงพอใจในระดับสูงมาก โดยมีคะแนนเฉลี่ยโดยรวมสูงกว่า 4.80 จากคะแนนเต็ม 5 ในทุกด้าน (S.D. < 0.58) ผลการพัฒนาชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถช่วยลดขั้นตอนการสั่งอาหาร ลดความผิดพลาดในการสื่อสาร และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการคิวอาหารได้จริงโดยไม่สร้างภาระค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ซึ่งตอบโจทย์วัตถุประสงค์ของโครงการในการสร้างเครื่องมือดิจิทัลที่เข้าถึงง่ายสำหรับธุรกิจร้านอาหารขนาดเล็ก

**คำสำคัญ:** ระบบจัดการร้านอาหาร เว็บแอปพลิเคชัน คิวอาร์โค้ด

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: attapon.p@pkru.ac.th

## Abstract

This research and development study presents the development and evaluation of Krua Khang Baan, a free-to-use in-store ordering web application targeted at small scale food entrepreneurs to address the challenges of cost and complexity in existing point of sale (POS) systems. The system was developed using a serverless architecture on the Google Firebase platform, utilizing core services such as Firebase Hosting, Firebase Authentication, and Cloud Firestore for the real time database. The customer side application allows users to scan a table specific QR code to view the menu, select food items with options, and submit orders directly to the kitchen. Meanwhile, the vendor side application enables entrepreneurs to manage restaurant information, menus, and monitor incoming orders in real-time via a Kanban style kitchen display system. A satisfaction evaluation, conducted as a pilot study with sample groups of entrepreneurs (n=3) and customers (n=19) using a 5-point Likert scale, revealed a very high level of satisfaction. Overall mean scores exceeded 4.80 out of 5 across all aspects (S.D. < 0.58). The development results indicate that the system successfully reduces order-taking steps, minimizes communication errors, and improves order queue management without imposing additional costs on the entrepreneurs, fulfilling the project's objective of creating an accessible digital tool for small food businesses.

**Keywords:** restaurant management system, web application, QR code

## บทนำ

ในยุคดิจิทัลปัจจุบัน การปรับใช้เทคโนโลยีถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร การเปลี่ยนแปลงสู่ดิจิทัลได้กลายเป็นยุทธศาสตร์หลักสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) เพื่อความอยู่รอดและเติบโต [1] อย่างไรก็ตามร้านอาหารขนาดเล็กในประเทศไทยซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของเศรษฐกิจท้องถิ่น ยังคงเผชิญกับความท้าทายในการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาปรับใช้ เนื่องจากยังคงใช้วิธีการจัดการร้านแบบดั้งเดิม เช่น การจดยรายการอาหารด้วยมือ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาข้อผิดพลาดในช่วงเวลาเร่งด่วนและความผิดพลาดในการสื่อสารระหว่างลูกค้าและห้องครัว

แม้ว่าปัจจุบันจะมีระบบจัดการร้านอาหาร (point of sale, POS) ที่ทันสมัยซึ่งช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ แต่ระบบส่วนใหญ่ยังมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าบริการรายเดือนที่สูง ทำให้เป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับผู้ประกอบการรายย่อยที่มีงบประมาณจำกัด จากงานวิจัยของ Kim และ Lee [2] พบว่าระบบสั่งอาหารผ่านคิวอาร์โค้ด (QR code) สามารถเพิ่มคุณภาพการบริการและความพึงพอใจของลูกค้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วยลดเวลารอคอยและลดความผิดพลาดของรายการอาหาร แต่การนำระบบดังกล่าวมาใช้ยังคงมีอุปสรรคด้านต้นทุนดังที่กล่าวมา

เพื่อแก้ไขช่องว่างทางเทคโนโลยีดังกล่าว โครงการครัวข้างบ้านจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นทางเลือก โดยเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่เปิดให้ใช้งานฟรี ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทดแทนระบบจัดการร้านอาหารที่มีราคาแพง โดยเลือกใช้สถาปัตยกรรมแบบเซิร์ฟเวอร์เลส (serverless) ซึ่งจากกรณีศึกษาต่างๆ พบว่าเป็นสถาปัตยกรรมที่ช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานและภาระในการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] โครงการมุ่งเน้นการแก้ปัญหาผ่านเทคโนโลยีที่เข้าถึงง่ายอย่างคิวอาร์โค้ดและสมาร์ทโฟนที่ผู้ใช้มีอยู่แล้ว โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างเครื่องมือดิจิทัลที่ผู้ประกอบการรายย่อยสามารถเข้าถึงและนำไปใช้ในการประกอบการร้านอาหารได้อย่างยั่งยืน

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านสำหรับการจัดการร้านอาหารขนาดเล็ก โดยใช้เทคโนโลยีคิวอาร์โค้ดและสมาร์ทโฟนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและลดต้นทุนของผู้ประกอบการรายย่อย
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ประกอบการร้านอาหารและผู้ใช้งานต่อการใช้งานเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านในด้านประสิทธิภาพ ความสะดวกในการใช้งาน และความเหมาะสมในการนำไปใช้จริง

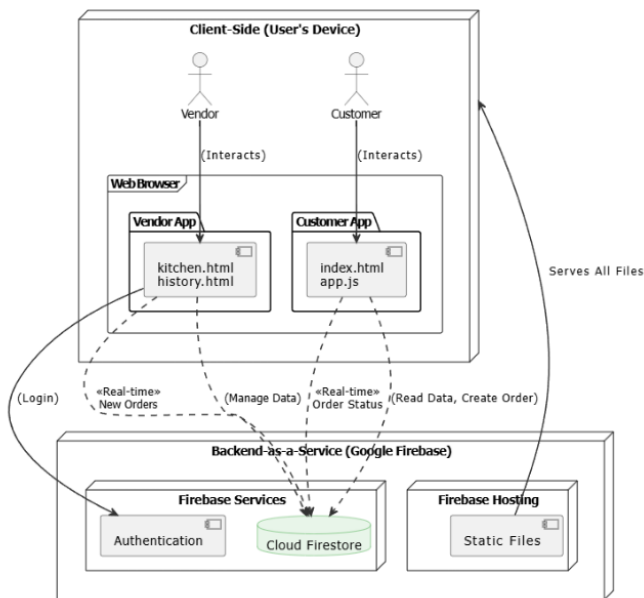
## วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการออกแบบและพัฒนาระบบ และส่วนของการวิจัยเชิงประเมินผล

## 1. การออกแบบและพัฒนาระบบ

### 1.1 สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีที่ใช้

โครงการเลือกใช้สถาปัตยกรรมแบบเซิร์ฟเวอร์เลสบนแพลตฟอร์ม Google Firebase [4] ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนในการจัดการโครงสร้างพื้นฐานและรองรับการสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์ (real-time) ได้อย่างสมบูรณ์ สถาปัตยกรรมของระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 1

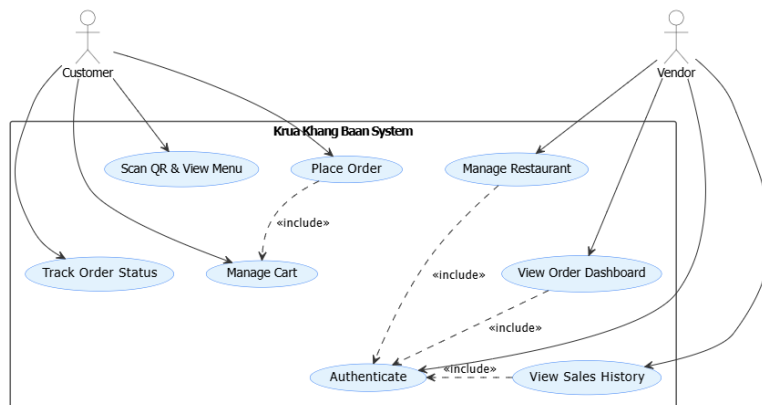


ภาพที่ 1 แผนภาพสถาปัตยกรรมของระบบ

เทคโนโลยีที่ใช้ในแต่ละส่วนประกอบด้วย Frontend พัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีเว็บมาตรฐาน ได้แก่ HTML5, CSS3, และ JavaScript (ES6) ร่วมกับ Bootstrap 5 Framework [5] เพื่อสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้ที่ตอบสนองต่อทุกขนาดหน้าจอ (responsive design) และ Backend & Database ใช้บริการจาก Google Firebase ประกอบด้วย บริการเว็บโฮสติ้ง (Firebase Hosting) สำหรับการปรับใช้ (deploy) บริการยืนยันตัวตน (Firebase Authentication) และบริการฐานข้อมูลแบบ NoSQL บนคลาวด์ (Cloud Firestore) [6] สำหรับเป็นฐานข้อมูลที่รองรับการปรับปรุงข้อมูลแบบเรียลไทม์

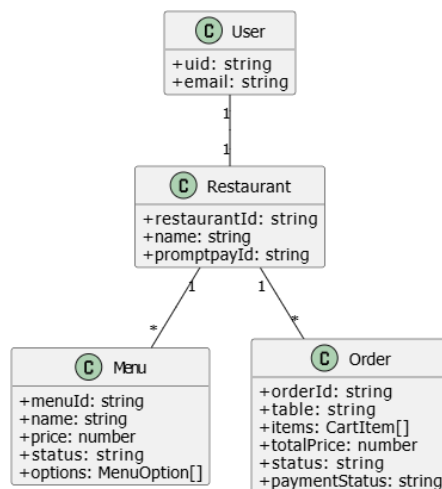
### 1.2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบที่มีความเสถียรและสามารถขยายตัวได้ในอนาคต การออกแบบจึงถูกพิจารณาจาก 2 มุมมองหลัก คือ การสร้างแบบจำลองเชิงพฤติกรรม (system behavior modeling) และการออกแบบโครงสร้างการเก็บข้อมูล (data structure design) โดยได้ใช้แผนภาพ UML และ EER Diagram เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และนำเสนอ ดังแสดงในภาพที่ 2-5



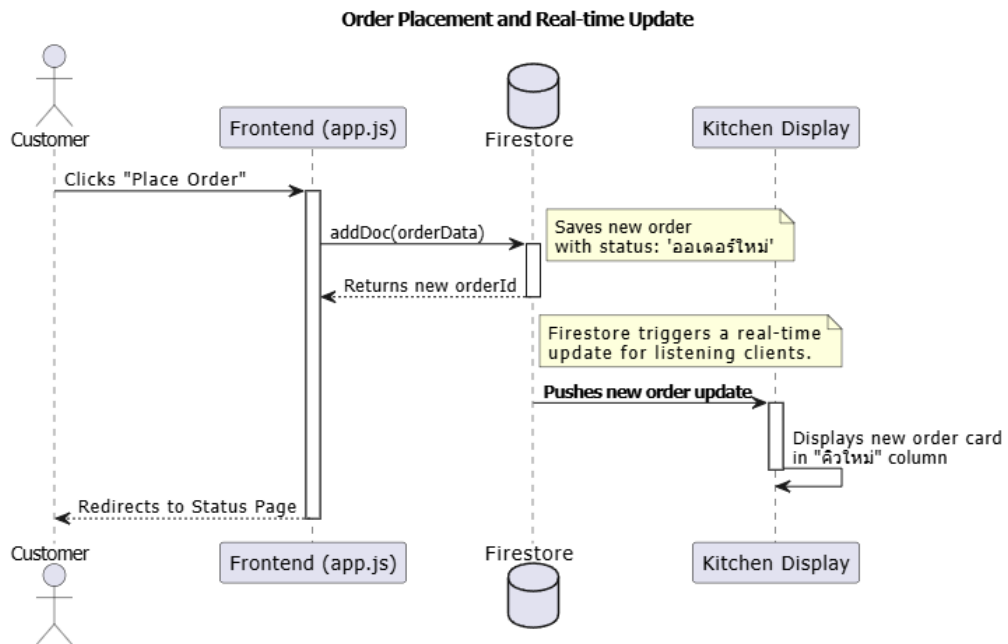
ภาพที่ 2 แผนภาพยูสเคส (use case diagram) ของระบบ

แผนภาพยูสเคส (use case diagram) แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันการทำงานหลักของระบบในมุมมองของผู้ใช้งาน (actors) 2 กลุ่ม คือ ลูกค้า (customer) และผู้ประกอบการ (vendor) โดยแผนภาพได้จำลองปฏิสัมพันธ์ทั้งหมดที่ผู้ใช้งานแต่ละกลุ่มสามารถกระทำต่อระบบได้ ตั้งแต่การสแกน QR code ของลูกค้า ไปจนถึงการจัดการข้อมูลร้านของผู้ประกอบการ ซึ่งทุกฟังก์ชันการจัดการของผู้ประกอบการนั้นจำเป็นต้องผ่านการยืนยันตัวตน (authenticate) ก่อนเสมอ



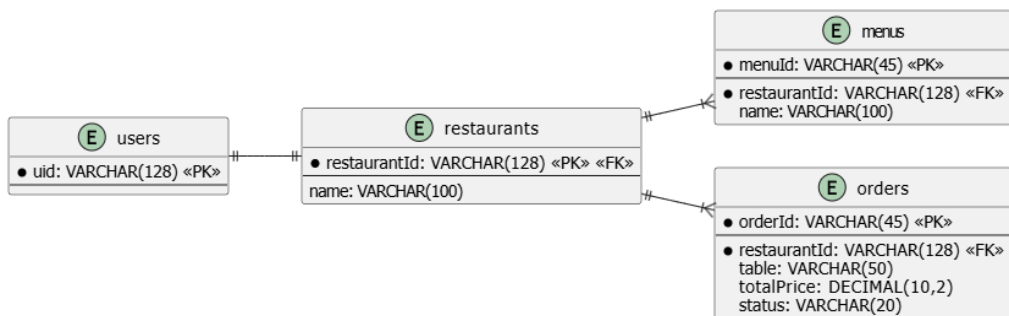
ภาพที่ 3 แผนภาพคลาส (class diagram) ของระบบ

แผนภาพคลาส (class diagram) แสดงโครงสร้างเชิงข้อมูลของเอนทิตี (entity) หลักภายในระบบ 4 ส่วน ได้แก่ ผู้ประกอบการ (user) ร้านอาหาร (restaurant) เมนู (menu) และออเดอร์ (order) รวมถึงแสดงความสัมพันธ์เชิงตรรกะระหว่างเอนทิตี (entity) เหล่านั้น เช่น ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง ระหว่างผู้ประกอบการและร้านอาหาร และความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่มระหว่างร้านอาหาร เมนู และออเดอร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบฐานข้อมูลต่อไป



ภาพที่ 4 แผนภาพซีควเอนซ์ (sequence diagram) ของระบบ

แผนภาพซีควเอนซ์ (sequence diagram) แสดงลำดับการโต้ตอบ (interaction) ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบในกระบวนการที่สำคัญที่สุด คือ การส่งคำสั่งซื้อของลูกค้า แผนภาพนี้แสดงให้เห็นถึงการสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดยเริ่มต้นจากการที่ Frontend ส่งคำสั่ง addDoc ไปยัง Firestore และหลังจากบันทึกข้อมูลสำเร็จ Firestore จะทำการส่ง (push) ข้อมูลอัปเดตไปยังหน้าจอแสดงผลสำหรับห้องครัว (kitchen display) โดยอัตโนมัติ



ภาพที่ 5 EER diagram ของระบบ

จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ผู้ประกอบการและร้านอาหารเป็นแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one-to-one) โดยใช้ uid จากบริการยืนยันตัวตน เป็น primary key และ foreign key เพื่อเชื่อมโยงเจ้าของกับร้านค้าอย่างชัดเจน ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างร้านอาหาร เมนู และออเดอร์ เป็นแบบหนึ่ง

ต่อกลุ่ม (one-to-many) ซึ่งในบริการฐานข้อมูลแบบ NoSQL บนคลาวด์ ความสัมพันธ์นี้ถูกสร้างขึ้นผ่านโครงสร้างคอลเลกชันย่อย (subcollection) ทำให้ข้อมูลถูกจัดกลุ่มอย่างเป็นระเบียบภายใต้เอกสาร (document) ของร้านอาหารที่เป็นเจ้าของซึ่งง่ายต่อการกำหนดกฎความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงในการดึงข้อมูล

## 2. การวิจัยเชิงประเมิณผล

### 2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินผลประกอบด้วย 2 กลุ่ม ซึ่งได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (purposive sampling) ได้แก่ 1) กลุ่มผู้ประกอบการร้านอาหารขนาดเล็กในจังหวัดภูเก็ต จำนวน 3 ร้าน และ 2) กลุ่มผู้รับบริการของร้านอาหารดังกล่าว จำนวน 19 คน

### 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลคือ แบบสอบถามความพึงพอใจออนไลน์ด้วย Google Form ซึ่งเป็นแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ แบ่งออกเป็น 2 ชุด สำหรับผู้ประกอบการและผู้รับบริการ โดยครอบคลุมด้านการใช้งาน ฟังก์ชันการทำงาน และความพึงพอใจโดยรวม

### 2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้นำเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านไปติดตั้งและสาธิตวิธีการใช้งานให้กับผู้ประกอบการทั้ง 3 ร้าน จากนั้นจึงให้ทดลองใช้งานระบบในสภาพแวดล้อมจริงเป็นระยะเวลา 5 วัน และจึงส่งลิงก์แบบประเมินออนไลน์ให้ทั้งกลุ่มผู้ประกอบการและกลุ่มผู้รับบริการตอบ

### 2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากแบบสอบถามถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย (mean:  $\bar{x}$ ) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: S.D.) ของคะแนนความพึงพอใจในแต่ละหัวข้อ

## ผลการวิจัย

ระบบถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของผู้ประกอบการ (vendor side) และส่วนของลูกค้า (customer side) ดังรายละเอียดในภาพที่ 6 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านพบว่าระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ประกอบการร้านอาหารขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีฟังก์ชันหลักที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงาน ได้แก่ การสั่งอาหารผ่านคิวอาร์โค้ดโดยลูกค้า การส่งรายการสั่งซื้อเข้าสู่ครัวแบบเรียลไทม์ การจัดการโต๊ะและรายการอาหาร รวมถึงการสรุปรายงานยอดขายเบื้องต้นในแต่ละวัน ระบบถูกออกแบบให้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนสมาร์ตโฟนโดยไม่ต้องติดตั้งแอปพลิเคชันเพิ่มเติม ทำให้ผู้ใช้งานเข้าถึงได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย ผลการทดสอบการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถทำงานได้ถูกต้อง เสถียร และช่วยลดเวลาในการรับรายการสั่งซื้อและความผิดพลาดในการสื่อสารระหว่างพนักงานเสิร์ฟและห้องครัวได้อย่างชัดเจน

สร้างร้าน

สมัครร้าน

anuwat29966@gmail.com

ออกจากระบบ

แดชบอร์ดจัดการร้าน

รหัสร้านค้าของคุณ: d1ctSVZrluZwoYmAfFdFpsZlYj3

🏠 ตั้งค่าร้านค้า

ชื่อร้านค้า

ควีนโม

บันทึกข้อมูลร้าน

📄 สร้าง QR Code สำหรับโต๊ะ

ชื่อ/หมายเลขโต๊ะ

เช่น โต๊ะ 1, T01

สร้าง QR Code

➕ เพิ่มเมนูใหม่

ชื่อเมนู

ราคาเริ่มต้น

เช่น กะเพราหมูสับ

50

ตัวเลือกเสริม (ถ้ามี)

+ เสริมด้วยผัก

เพิ่มเมนูลงในร้าน

รายการเมนูของคุณ

ข้าวหมูกรอบ

ราคาเริ่มต้น: 50 บาท | สถานะ: มีของ

~ 15 นาที (+10 นาที)

หาเครื่องเทศว่า "ของหมด"

ลบ

ข้าวไข่ไก่แซ่บ

ราคาเริ่มต้น: 45 บาท | สถานะ: มีของ

~ 10 นาที (+10 นาที)  
~ 15 นาที (+15 นาที)

หาเครื่องเทศว่า "ของหมด"

ลบ

รายการออเดอร์วันนี้

คิวใหม่

กำลังทำ

พร้อมรับ

มีออเดอร์ใหม่

ครัวโมโม

รายการอาหาร

ข้าวหมกไก่

ราคาเริ่มต้น 50 บาท

☐ พิเศษ (+10 บาท)

+ เพิ่ม

ข้าวผัดไก่แบบ

ราคาเริ่มต้น 45 บาท

☐ ไข่ดาว (+10 บาท)

☐ ไข่เจียว (+15 บาท)

+ เพิ่ม

โปรดชำระของคุณ

บัตรเครดิตว่างอยู่

ยอดรวม: 0.-

ยืนยันการสั่งซื้อ

ภาพที่ 6 (ก) ภาพหน้าจอแดชบอร์ดสำหรับผู้ประกอบการ (ข) ภาพหน้าจอการสั่งอาหารและติดตามสถานะของลูกค้า

### ผลการประเมินจากกลุ่มผู้ประกอบการ

จากตารางที่ 1 พบว่าผู้ประกอบการมีความพึงพอใจในระดับสูงมากในทุกด้าน โดยเกือบทุกหัวข้อได้รับคะแนนเฉลี่ยเต็ม 5.00 คะแนน (S.D. = 0.00) ยกเว้นหัวข้อความรวดเร็วในการปรับปรุงรายการอาหารใหม่ที่ได้คะแนนเฉลี่ย 4.67 (S.D. = 0.58) ซึ่งยังคงอยู่ในระดับสูงมาก ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าระบบสามารถตอบโจทย์การใช้งานในมุมมองของผู้ประกอบการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการใช้งานโดยรวม ฟังก์ชันการจัดการร้าน และการจัดการคำสั่งซื้อ

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนความพึงพอใจจากผู้ประกอบการ (n=3)

| ข้อ | หัวข้อการประเมิน                        | ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) | S.D. |
|-----|-----------------------------------------|-------------------------|------|
| 1   | ความง่ายในการเริ่มต้นใช้งาน             | 5.00                    | 0.00 |
| 2   | ความเข้าใจง่ายของเมนูและการจัดวาง       | 5.00                    | 0.00 |
| 3   | ความสะดวกในการใช้งานผ่านอุปกรณ์พกพา     | 5.00                    | 0.00 |
| 4   | ความสะดวกในการตั้งค่าร้านอาหาร          | 5.00                    | 0.00 |
| 5   | ความง่ายในการสร้างคิวอาร์โค้ด           | 5.00                    | 0.00 |
| 6   | ความสะดวกในการเพิ่มเมนูและตัวเลือกเสริม | 5.00                    | 0.00 |
| 7   | ความง่ายในการเปลี่ยนสถานะเมนู           | 5.00                    | 0.00 |
| 8   | ความชัดเจนของ Kanban Board              | 5.00                    | 0.00 |
| 9   | ความรวดเร็วในการปรับปรุงรายการอาหารใหม่ | 4.67                    | 0.58 |
| 10  | ความง่ายในการปรับปรุงสถานะอาหาร         | 5.00                    | 0.00 |
| 11  | ความพึงพอใจโดยรวม                       | 5.00                    | 0.00 |

### ผลการประเมินจากกลุ่มผู้รับบริการ

จากตารางที่ 2 พบว่าผู้รับบริการมีความพึงพอใจในระดับสูงมากในทุกหัวข้อ โดยทุกรายการมีคะแนนเฉลี่ยสูงกว่า 4.70 คะแนน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความชัดเจนของหน้าจอติดตามสถานะที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยเต็ม 5.00 คะแนน (S.D. = 0.00) ในขณะที่ความสะดวกในการเลือกตัวเลือกเสริมซึ่งได้คะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุดที่ 4.74 คะแนน (S.D. = 0.45) ก็ยังคงสะท้อนถึงความพึงพอใจในระดับสูง ประกอบกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในระดับต่ำในทุกหัวข้อ (เฉลี่ย 0.31) บ่งชี้ว่าผู้ใช้งานส่วนใหญ่มีความคิดเห็นต่อระบบไปในทิศทางบวกอย่างเป็นเอกฉันท์

### สรุปผลการประเมิน

ผลการประเมินจากผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่มยืนยันตรงกันว่า เว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านสามารถมอบประสบการณ์การใช้งานที่ดีและมีประสิทธิภาพ โดยสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการในการสร้างเครื่องมือดิจิทัลที่เข้าถึงง่ายสำหรับร้านอาหารขนาดเล็กได้สำเร็จ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนความพึงพอใจจากผู้รับบริการ (n=19)

| ข้อ | หัวข้อการประเมิน                   | ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) | S.D. |
|-----|------------------------------------|-------------------------|------|
| 1   | ความสะดวกในการสแกนคิวอาร์โค้ด      | 4.95                    | 0.23 |
| 2   | ความชัดเจนของหน้าจอเมนู            | 4.84                    | 0.37 |
| 3   | ประสบการณ์บนจอมือถือโดยรวม         | 4.89                    | 0.31 |
| 4   | ความง่ายในการเพิ่มอาหารลงตะกร้า    | 4.95                    | 0.23 |
| 5   | ความสะดวกในการเลือกตัวเลือกเสริม   | 4.74                    | 0.45 |
| 6   | ความชัดเจนของหน้าจอตะกร้าสินค้า    | 4.84                    | 0.37 |
| 7   | ความง่ายในการยืนยันรายการอาหาร     | 4.95                    | 0.23 |
| 8   | ความชัดเจนของหน้าจอติดตามสถานะ     | 5.00                    | 0.00 |
| 9   | ประโยชน์ของการเห็นสถานะถูกปรับปรุง | 4.95                    | 0.23 |
| 10  | ความพึงพอใจโดยรวม                  | 4.95                    | 0.23 |
| 11  | โอกาสในการกลับมาใช้งานอีกครั้ง     | 4.95                    | 0.23 |

### อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการประเมินความพึงพอใจที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยในระดับสูงมากจากทั้งกลุ่มผู้ประกอบการ ( $\bar{X} \geq 4.67$ ) และกลุ่มผู้รับบริการ ( $\bar{X} \geq 4.74$ ) สามารถอภิปรายได้ว่าเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาที่ตั้งไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม โดยสถาปัตยกรรมแบบเซิร์ฟเวอร์เลสบนแพลตฟอร์ม Google Firebase ได้ช่วยลดอุปสรรคด้านต้นทุนและโครงสร้างพื้นฐานสำหรับผู้ประกอบการรายย่อยได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongsakorn [1] ที่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของเครื่องมือดิจิทัลที่เข้าถึงง่ายในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในอุตสาหกรรมอาหาร

ในมุมมองของผู้ใช้งาน ผลการประเมินที่สูงนั้นสอดคล้องกับทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี (technology acceptance model, TAM) [7] ซึ่งระบุว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยี คือ การรับรู้ถึงประโยชน์ (perceived usefulness) และการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (perceived ease of use) คะแนนความพึงพอใจในระดับสูงจากลูกค้าในหัวข้อความสะดวกในการสแกนคิวอาร์โค้ด ( $\bar{X} = 4.95$ ) และความง่ายในการเพิ่มอาหารลงตะกร้า ( $\bar{X} = 4.95$ ) สะท้อนถึงการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin และ Hsieh [8] ที่ศึกษาถึงความง่ายในการใช้งานของแอปพลิเคชันสั่งอาหาร ในขณะเดียวกัน ผลลัพธ์เชิงคุณภาพที่ผู้ใช้ชื่นชอบความรวดเร็วและลดขั้นตอนการรอคอย ก็เป็นการยืนยันถึงการรับรู้ถึงประโยชน์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alalwan [9] ที่พบว่าประสิทธิภาพและความสะดวกของแอปพลิเคชันสั่งอาหารบนมือถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของลูกค้า

อย่างไรก็ตาม โครงการในครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องระบบชำระเงินที่ยังคงเป็นการชำระเงินที่เคาน์เตอร์ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดด้านความปลอดภัยของระบบธนาคารที่ไม่เปิดช่องทางให้เว็บแอปพลิเคชันทั่วไปสามารถตรวจสอบสถานะการทำธุรกรรมได้โดยตรง สำหรับโจทย์วิจัยที่จะต้องออกจากงานวิจัยครั้งนี้คือการผนวกรวมระบบเข้ากับเกตเวย์การชำระเงิน (payment gateway) ที่ได้รับการรับรองเพื่อสร้างระบบชำระเงินออนไลน์ที่สมบูรณ์ และการพัฒนาระบบสรุปยอดขายเชิงวิเคราะห์ (sales analytics) เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผนและจัดการสต็อกวัตถุดิบได้ดียิ่งขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันครัวข้างบ้านซึ่งเป็นเครื่องมือจัดการคำสั่งซื้อ ณ ร้านค้าที่ใช้งานง่ายและไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ประกอบการรายย่อย โดยสามารถบรรลุมิติวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ครบถ้วน กล่าวคือได้พัฒนาระบบที่สามารถทำงานได้ครบวงจรตั้งแต่การสั่งอาหารของลูกค้าไปจนถึงการจัดการรายการอาหารของร้านค้าแบบเรียลไทม์ และผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานจริงทั้งสองกลุ่มยืนยันว่าระบบมีประสิทธิภาพสูง สร้างความสะดวก และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้จริง ซึ่งเป็นแนวทางที่ชัดเจนในการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพให้กับธุรกิจขนาดเล็กได้อย่างเป็นรูปธรรม

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการครัวข้างบ้านจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ueasangkomsate, P. (2025). Empowering Thai SMEs through IT competency, digitalization and digital transformation for new product development. *Cogent Business & Management*, 12(1), 2458758.
- [2] Alalwan, A. A. (2020). Mobile food ordering apps: An empirical study of the factors affecting customer e-satisfaction and e-loyalty. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 53, 101961.
- [3] Adzic, G., & Chatley, R. (2017). Serverless computing: economic and architectural impact (pp. 884–889). In *Proceedings of Joint Meeting on Foundations of Software Engineering*.
- [4] Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of Use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
- [5] Adzic, G., & Chatley, R. (2017). Serverless computing: Economic and architectural impact (pp. 884–889). In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Joint Meeting on Foundations of Software Engineering*. Association for Computing Machinery.

- [6] Google. (2024). Firebase documentation. [online], retrieved from <https://firebase.google.com/docs> (29 May 2026).
- [7] Otto, M., & Thornton, J. (2024). Bootstrap v5.1 documentation. [online], retrieved from <https://getbootstrap.com/docs/5.1/> (29 May 2026).
- [8] Google. (2024). Cloud Firestore documentation. [online], retrieved from <https://https://firebase.google.com/docs/firestore> (29 May 2026).

## การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของการปนเปื้อนไมโครพลาสติก ในแหล่งน้ำผิวดิน จังหวัดภูเก็ต

### Seasonal Variation of Microplastic Contamination in Surface Waters of Phuket Province

อรรสา นานาน<sup>\*1</sup>, สุดารัตน์ ไสแสง<sup>1</sup>, อัศมน ลิมสกุล<sup>1</sup>,  
दनัย ทิพย์มณี<sup>2</sup>, ธนกร จิวรุ่งเรืองกุล<sup>2</sup> และ ธนิตา อารีรบ<sup>2</sup>  
Orasa Naban<sup>\*1</sup>, Sudarat Saisang<sup>1</sup>, Atsamon Limsakul<sup>1</sup>,  
Danai Tipmanee<sup>2</sup>, Thanakorn Jiwurungreangkul<sup>2</sup> & Thanita Areerob<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ศูนย์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยี  
ตำบลคลองห้า อำเภอกลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

<sup>2</sup> คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต 83120

<sup>1</sup>Climate Change and Environmental Research Center, Technopolis,  
Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120

<sup>2</sup>Faculty of Technology and Environment, Prince of Songkla University, Phuket Campus, Phuket 83120

Submitted 12/01/2026 ; Revised 10/03/2026 ; Accepted 17/03/2026

#### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปนเปื้อนและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยเก็บตัวอย่างน้ำตามแนวคลองบางใหญ่และคลองปากบาง จำนวน 11 สถานี ในช่วงฤดูร้อน (เมษายน) และฤดูฝน (กรกฎาคม) พ.ศ. 2567 มาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่า มีการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกทุกสถานีในแหล่งชุมชน โดยปริมาณการปนเปื้อนในฤดูฝนสูงกว่าฤดูร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ประมาณ 1.3–4.7 เท่า ทั้งนี้ ไมโครพลาสติกส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 50 มีขนาด 30–100 ไมโครเมตร การปนเปื้อนสูงสุดพบบริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำในฤดูร้อน 20.4 ชิ้นต่อลิตร และบริเวณชุมชนเมืองในฤดูฝน 40.2 ชิ้นต่อลิตร ไมโครพลาสติกรูปร่างเส้นใยพบมากที่สุด ส่วนชนิดพอลิเมอร์หลักที่พบคือ เรยอน โพลีไสตรีน โพลีเอทิลีน และโพลีโพรพิลีน ซึ่งค่อนข้างสัมพันธ์กับกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การซักผ้าและการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติก ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกขนาดเล็ก ซึ่งมีสัดส่วนการปนเปื้อนในแหล่งน้ำค่อนข้างสูง เนื่องจากขนาดของไมโครพลาสติกนับเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดความเสียหายและความเป็นพิษที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบนิเวศสิ่งมีชีวิตและความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์

**คำสำคัญ:** ไมโครพลาสติก การปนเปื้อน แหล่งน้ำผิวดิน

**\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)**

E-mail: Orasanaban@gmail.com

## Abstract

This study aimed to investigate the contamination and seasonal variation of microplastics in surface waters in Phuket Province, Thailand. Surface water samples were collected from Khlong Bang Yai and Khlong Pak Bang at a total of 11 sampling stations during the dry season (April) and the rainy season (July) in 2024. The samples were analyzed in the laboratory using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) technique. The results showed that microplastic contamination was detected at all sampling stations in urban areas. The abundance of microplastics in the rainy season was significantly higher than that in the dry season ( $P < 0.05$ ), approximately 1.3–4.7 times. More than 50% of the detected microplastics were small particles ranging from 30 to 100  $\mu\text{m}$  in size. The highest concentrations were observed downstream of the effluent discharge point from a wastewater treatment plant during the dry season 20.4 items/L and in urban community areas during the rainy season 40.2 items/L. Fiber-shaped microplastics were the most dominant form detected. The major polymer types identified were rayon, polystyrene, polyethylene, and polypropylene, which are closely associated with human activities such as laundry processes and the use of plastic packaging. The findings highlight the importance of analyzing small-sized microplastics, which account for a relatively high proportion of contamination in surface water, as particle size is a key factor influencing environmental impacts, toxicity, and potential risks to aquatic ecosystems and human health.

**Keywords:** microplastics, contamination, surface waters

## บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เช่น บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สิ่งทอ อุตสาหกรรมการผลิต และการขนส่ง การใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นควบคู่กับอัตราการบริโภคที่สูงขึ้น และการจัดการของเสียจากพลาสติกที่ไม่ถูกหลักสุขาภิบาลส่งผลให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมหาศาลทั่วโลก [1–3] พลาสติกที่สะสมในสิ่งแวดล้อมจะเกิดการเสื่อมสภาพและแตกตัวผ่านกระบวนการทางกายภาพและชีวเคมีที่ซับซ้อนจนกลายเป็นไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้ไม่ละลายน้ำ ย่อยสลายได้ยากและมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้สามารถแพร่กระจายและคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน [4] นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกยังสามารถยึดเกาะและปะปนกับแพลงก์ตอนซึ่งเป็นแหล่งอาหารของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เมื่อสัตว์น้ำบริโภคแพลงก์ตอนเข้าไปอนุภาคไมโครพลาสติกเหล่านี้จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและถ่ายทอดไปตามลำดับขั้นของการบริโภคอาหารในระบบนิเวศ [5]

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในระบบนิเวศแหล่งน้ำผิวดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [6] สำหรับประเทศไทย ข้อมูลการศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ผ่านมายังมีการศึกษาบางส่วน พบว่ามีการศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา พ.ศ. 2565 พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาด 20–200  $\mu\text{m}$  (ไมโครเมตร) ร้อยละ 72.31 และขนาด 200–2,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 27.69 และไม่พบขนาดใหญ่มากกว่า 2,000  $\mu\text{m}$  [7] แหล่งน้ำผิวดินบริเวณคลองท่อ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกสูงสุดเดือนกรกฎาคม จำนวน 1,580 ชิ้น/ลิตร [8] แหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงบอระเพ็ด จังหวัดนครสวรรค์ พ.ศ. 2562 พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาด 300–900  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 100 ในฤดูร้อน และขนาด 300–900  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 60 และขนาด 1,000–4,749  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 40 ในฤดูฝน [9] กลุ่มน้ำบางปะกง พ.ศ. 2565 พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาด 20–999  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 36.94 และขนาด 1,000–5,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 63.06 [10] และแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณจังหวัดอ่างทอง พ.ศ. 2562 พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกสูงสุดขนาด 53–500  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 39.45 รองลงมาคือ ขนาด 1,000–5,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 31.30 และขนาด 500–1,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 29.26 [11] จากผลการศึกษาข้างต้นสะท้อนให้เห็นว่าแหล่งน้ำผิวดินในประเทศไทยมีการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในทุกพื้นที่ศึกษา และมีความหลากหลายของขนาดที่แตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ไมโครพลาสติก จึงไม่สามารถนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบกันได้โดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสถานการณ์การปนเปื้อนไมโครพลาสติก โดยเฉพาะขนาดเล็กในแหล่งน้ำผิวดิน เนื่องจากสามารถเป็นพาหะนำสารมลพิษต่าง ๆ เมื่อสัตว์น้ำบริโภคเข้าไป สารมลพิษดังกล่าวอาจถูกถ่ายทอดและสะสมในห่วงโซ่อาหาร [5]

จังหวัดภูเก็ตเป็นจังหวัดที่เป็นเกาะขนาดใหญ่ที่สุดของประเทศไทย มีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วและเป็นแหล่งท่องเที่ยวทางทะเลที่สำคัญระดับประเทศและนานาชาติ อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของกิจกรรมทางเศรษฐกิจนี้อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การสะสมของขยะมูลฝอยในจังหวัดภูเก็ต การปล่อยน้ำเสียลงสู่คูคลองและแหล่งน้ำ การเพิ่มจำนวนแพลงก์ตอนพืชที่อาจนำไปสู่ปัญหาน้ำเน่าเสีย และการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำ [12, 13] งานวิจัยฉบับนี้

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปนเปื้อนและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยครอบคลุมช่วงขนาดอนุภาคตั้งแต่ 5,000–30  $\mu\text{m}$  ผลงานวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลทางวิชาการในการสนับสนุนการวางแผนและการจัดการสิ่งแวดล้อมในพื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การพัฒนาเศรษฐกิจของจังหวัดภูเก็ตดำเนินควบคู่กับการรักษาสมดุลของระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

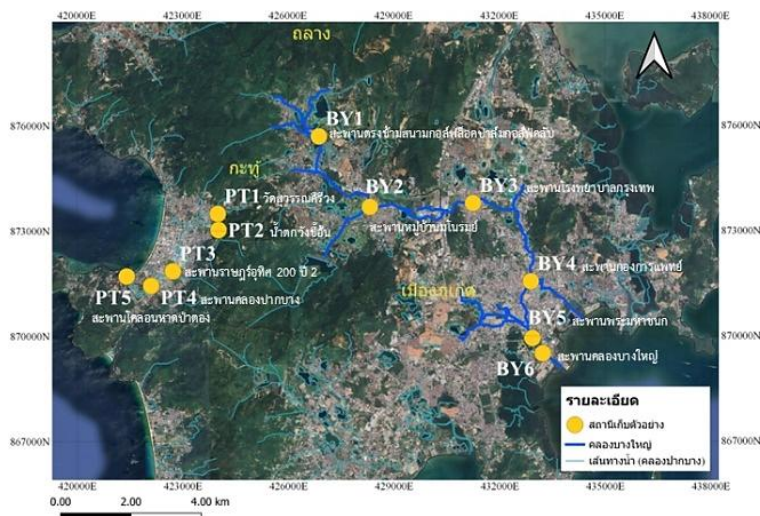
### วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการปนเปื้อนและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ดำเนินเก็บตัวอย่างในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านพื้นที่เขตเทศบาลนครภูเก็ตและเทศบาลเมืองป่าตอง จังหวัดภูเก็ต โดยได้กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างทั้งหมด 11 สถานี ในเขตเทศบาลนครภูเก็ต ดำเนินการเก็บน้ำผิวดินบริเวณคลองบางใหญ่ 6 สถานี (BY1–BY6) ซึ่งไหลผ่านพื้นที่ชุมชนสำคัญ ได้แก่ ชุมชนวิชิต ชุมชนรัชฎา ก่อนไหลลงสู่ทะเลด้านทิศตะวันออกบริเวณแหลมสะพานหิน คลองมีความยาวกว่า 20 กิโลเมตร ในเขตเทศบาลเมืองป่าตอง ดำเนินการเก็บน้ำผิวดินบริเวณคลองปากบาง 5 สถานี (PT1–PT5) ซึ่งไหลผ่านพื้นที่ชุมชนในป่าตอง ก่อนไหลลงสู่ทะเลด้านทิศตะวันตกบริเวณชายหาดป่าตอง คลองมีความยาวประมาณ 3 กิโลเมตร ทั้งนี้ ได้กำหนดจุดเก็บตัวอย่างโดยแบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ครอบคลุมพื้นที่ต้นน้ำ (BY1 และ PT1) พื้นที่ชุมชนเมือง บริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ และพื้นที่ปากน้ำ (BY6 และ PT5) เพื่อเป็นตัวแทนของแหล่งที่มาและกิจกรรมที่อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในจังหวัดภูเก็ต (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 แสดงพื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่างน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต

## 2. การเก็บตัวอย่าง

ดำเนินการเก็บตัวอย่างไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินทั้งหมด 2 ช่วงฤดูกาล คือ ฤดูร้อนในเดือนเมษายน และฤดูฝนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2567 โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (grab sampling) ที่ระดับผิวน้ำถึงความลึก 30 เซนติเมตร [14] โดยใช้ถังสแตนเลสขนาด 10 ลิตร จากนั้นกรองน้ำปริมาณ 10 ลิตร ผ่านตะแกรงอะลูมิเนียม ขนาด 5,000, 100 และ 30  $\mu\text{m}$  ซ้อนเรียงจากบนลงล่างตามลำดับ [15] ตัวอย่างที่ตกค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดจะถูกรวบรวมและชะล้างรวมกันลงในขวดแก้วสีขา ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 1 ขวด ต่อสถานีเก็บตัวอย่างและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $4\pm 2$  องศาเซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของตัวอย่างน้ำ วัสดุอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้จะเป็นแก้วและสแตนเลส ซึ่งก่อนใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดเครื่องแก้วด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เจือจางที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10 และทำความสะอาดสแตนเลสด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิที่ 60–70 องศาเซลเซียสจนแห้งและคลุมด้วยอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันฝุ่นและการปนเปื้อนของพลาสติกก่อนนำไปใช้งาน

## 3. การวิเคราะห์ไมโครพลาสติก

วิเคราะห์การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในน้ำผิวดินดำเนินการตามวิธีการที่พัฒนาโดย Limsakul และคณะ [15] นำตัวอย่างมาย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ความเข้มข้น 30% ในอัตราส่วน 1:1 (V/V) และปล่อยให้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $45\pm 5$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่พลาสติก และสกัดไมโครพลาสติกด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) ในอัตราส่วน 1:5 (W/V) เพื่อแยกไมโครพลาสติกออกจากอนุภาคตะกอนอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น โดยไมโครพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำจะลอยขึ้นสู่ชั้นผิวน้ำด้านบน ขณะที่อนุภาคตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงจะจมลงสู่ด้านล่าง และปล่อยให้เกิดการแยกชั้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำอนุภาคที่ลอยตัวมากรองแยกขนาดผ่านตะแกรงอะลูมิเนียม ขนาด 1,000, 300, 100 และ 30  $\mu\text{m}$  ซ้อนเรียงจากบนลงล่างตามลำดับ ตัวอย่างที่ตกค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดจะถูกชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนลงบนแผ่นกรอง Anodisc ขนาด 20  $\mu\text{m}$  ด้วยการกรองสุญญากาศ จำนวน 1 แผ่น ต่อหนึ่งขนาดตะแกรง และนำไปดูความเข้มข้นจนแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ข้อมูลขนาดของไมโครพลาสติกโดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 1,000–5,000  $\mu\text{m}$ , 300–1,000  $\mu\text{m}$ , 100–300  $\mu\text{m}$  และ 30–100  $\mu\text{m}$  ลักษณะรูปร่างจำแนกออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ ฟิล์ม แผ่นชิ้นเล็ก เม็ด เส้นใย และไร้รูปแบบ และสีของไมโครพลาสติกบันทึกเป็นกลุ่มสีตามลักษณะที่มองเห็นด้วยสายตาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด และระบุชนิดของพอลิเมอร์โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum 3 เชื่อมต่อกับ Spotlight 400 microscope โดยใช้โหมด transmission ในช่วงเลขคลื่น  $400\text{--}4,000\text{ cm}^{-1}$  ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมถูกเทียบกับฐานข้อมูลและใช้เกณฑ์ความสอดคล้องของสเปกตรัมมากกว่าร้อยละ 80 เพื่อยืนยันชนิดของพอลิเมอร์

## 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

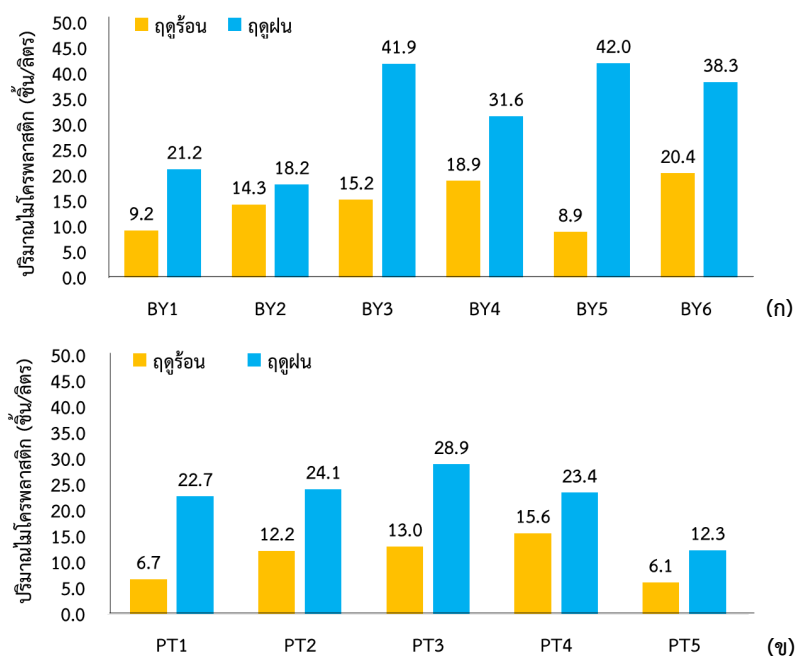
วิเคราะห์ข้อมูลปริมาณ ลักษณะรูปร่าง สี และชนิดของไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำผิวดินของแต่ละสถานีด้วยสถิติเชิงพรรณนา และเปรียบเทียบปริมาณการปนเปื้อนไมโครพลาสติก

ระหว่างฤดูแล้งกับฤดูฝนด้วยสถิติ t-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ IBM SPSS Statistics เวอร์ชัน 25

## ผลการวิจัย

### 1. ปริมาณการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำผิวดิน

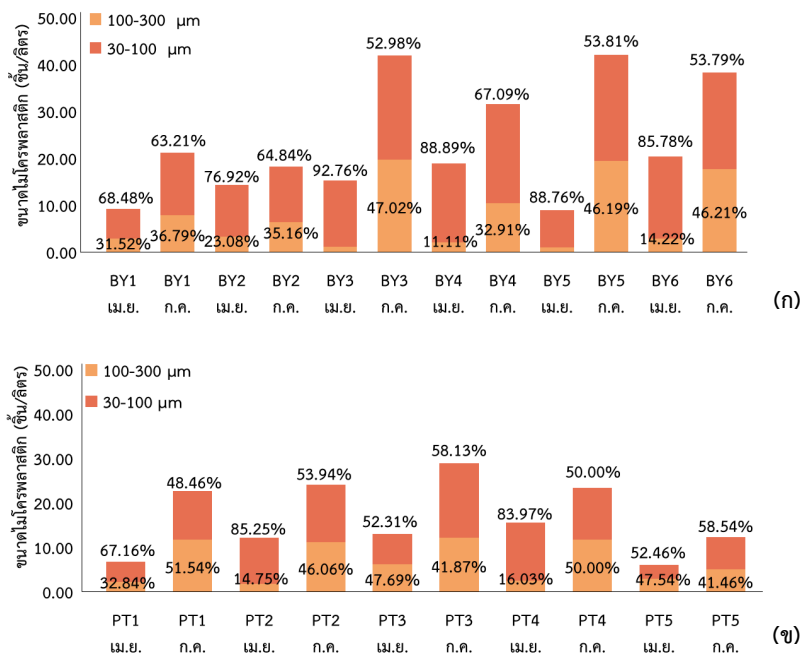
น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ตพบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในทุกสถานี โดยในช่วงฤดูร้อนมีปริมาณการปนเปื้อนอยู่ในช่วง 8.9–20.4 ชิ้น/ลิตร พบสูงสุดที่สถานี BY6 (บริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ) จำนวน 20.4 ชิ้น/ลิตร ในช่วงฤดูฝนพบปริมาณการปนเปื้อนอยู่ในช่วง 18.2–42.0 ชิ้น/ลิตร พบสูงสุดที่สถานี BY5 (พื้นที่ชุมชนเมือง) จำนวน 42.0 ชิ้น/ลิตร ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนในฤดูฝนเพิ่มขึ้นประมาณ 1.3–4.7 เท่า เมื่อเทียบกับฤดูร้อน ในน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตองพบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในทุกสถานีเช่นกันโดยในช่วงฤดูร้อนมีปริมาณการปนเปื้อนอยู่ในช่วง 6.1–15.6 ชิ้น/ลิตร พบสูงสุดที่สถานี PT4 (บริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ) จำนวน 15.6 ชิ้น/ลิตร ในช่วงฤดูฝนพบปริมาณการปนเปื้อนอยู่ในช่วง 12.3–28.9 ชิ้น/ลิตร พบสูงสุดที่สถานี PT3 (พื้นที่ชุมชนเมือง) จำนวน 28.9 ชิ้น/ลิตร ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนในฤดูฝนเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5–3.4 เท่า เมื่อเทียบกับฤดูร้อน (ภาพที่ 2) การศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ตมีการปนเปื้อนสูงกว่าน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง และพบการปนเปื้อนในฤดูฝนสูงกว่าฤดูร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในทั้งสองเขตพื้นที่ โดยปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดพบบริเวณจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำและพื้นที่ชุมชนเมือง ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ที่มีผลต่อการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดิน



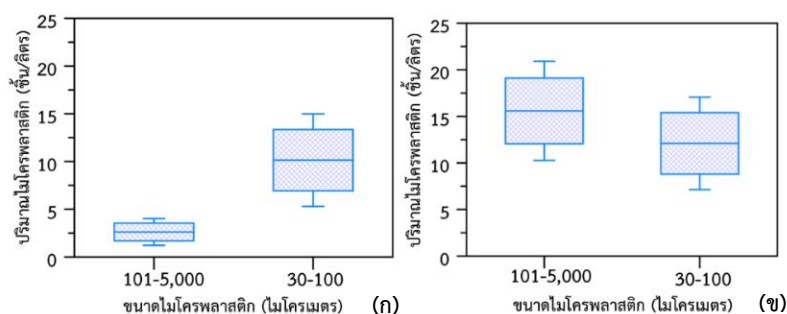
ภาพที่ 2 ปริมาณการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในฤดูร้อนและฤดูฝน พ.ศ. 2567 (ก) น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต และ (ข) น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง

## 2. ขนาดของไมโครพลาสติกในตัวอย่างน้ำผิวดิน

ขนาดของไมโครพลาสติกแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ 1,000–5,000  $\mu\text{m}$ , 300–1,000  $\mu\text{m}$ , 100–300  $\mu\text{m}$  และ 30–100  $\mu\text{m}$  จากผลการศึกษาพบการปนเปื้อนไมโครพลาสติก 2 ช่วงขนาดส่วนใหญ่เป็นไมโครพลาสติกขนาดเล็ก 30–100  $\mu\text{m}$  และไม่พบไมโครพลาสติกที่มีขนาดใหญ่กว่า 300  $\mu\text{m}$  ในทั้งสองพื้นที่ น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต ฤดูร้อน พบไมโครพลาสติกขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 83.60 โดยพบสูงสุดที่สถานี BY6 (บริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ) จำนวน 17.5 ชิ้น/ลิตร คิดเป็นร้อยละ 85.78 ของปริมาณทั้งหมด ฤดูฝน พบไมโครพลาสติกขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  มีสัดส่วนเฉลี่ยลดลงเป็นร้อยละ 59.29 และพบสูงสุดที่สถานี BY5 (พื้นที่ชุมชนเมือง) จำนวน 22.6 ชิ้น/ลิตร ในน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง ฤดูร้อน พบไมโครพลาสติกขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 68.23 โดยพบสูงสุดที่สถานี PT4 (บริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ) จำนวน 13.1 ชิ้น/ลิตร ฤดูฝน พบไมโครพลาสติกขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  มีสัดส่วนเฉลี่ยร้อยละ 53.81 และพบสูงสุดที่สถานี PT3 (พื้นที่ชุมชนเมือง) จำนวน 16.8 ชิ้น/ลิตร (ภาพที่ 3) หากพิจารณาจัดกลุ่มไมโครพลาสติกออกเป็นสองขนาด ได้แก่ ไมโครพลาสติกขนาดเล็ก 30–100  $\mu\text{m}$  และไมโครพลาสติกขนาดใหญ่ 101–5,000  $\mu\text{m}$  ทุกสถานีในพื้นที่เขตเทศบาลนครภูเก็ตและเทศบาลเมืองป่าตอง พบว่าไมโครพลาสติกขนาดเล็กมีปริมาณสูงกว่าไมโครพลาสติกขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ทั้งสองฤดูกาล เมื่อทดสอบด้วยสถิติ t-test (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 3 ปริมาณและร้อยละของขนาดไมโครพลาสติกในฤดูร้อนและฤดูฝน พ.ศ. 2567 (ก) น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต และ (ข) น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง



ภาพที่ 4 แผนภาพบ็อกซ์พลอต (boxplot) แสดงขนาดของไมโครพลาสติกขนาดเล็ก (30–100  $\mu\text{m}$ ) และขนาดใหญ่ (101–5,000  $\mu\text{m}$ ) ทุกสถานีในพื้นที่เขตเทศบาลนครภูเก็ตและเทศบาลเมืองป่าตอง เส้นกลางแสดงค่ามัธยฐาน ขอบบนและขอบล่างแสดงค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ก) เดือนเมษายน (ฤดูร้อน) (ข) เดือนกรกฎาคม (ฤดูฝน) พ.ศ. 2567

### 3. สีและลักษณะรูปร่างของไมโครพลาสติก

สีของไมโครพลาสติกที่พบในน้ำผิวดินจังหวัดภูเก็ต มีทั้งหมด 13 สี ได้แก่ สีขาว สีไม่มีสี สีดำ สีเหลือง สีน้ำเงิน สีฟ้า สีเขียว สีชมพู สีแดง สีม่วง สีส้ม และสีน้ำตาล จากผลการศึกษา พบว่าน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต พบสีของไมโครพลาสติกสูงสุด 3 ลำดับแรก คือ สีไม่มีสี ร้อยละ 48.63 รองลงมาคือ สีขาว ร้อยละ 30.13 และสีเหลือง ร้อยละ 5.03 ในน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง พบสีของไมโครพลาสติกสูงสุด 3 ลำดับแรก คือ สีขาว ร้อยละ 34.48 รองลงมาคือ สีไม่มีสี ร้อยละ 33.52 และสีดำ ร้อยละ 8.06 การศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า สีหลักที่พบทั้งสองเขตพื้นที่ คือ สีไม่มีสีและสีขาว ซึ่งแหล่งที่มาหลักมาจากบรรจุภัณฑ์พลาสติก เสื้อผ้า และการสะสมในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้สีของไมโครพลาสติกอ่อนลง

ลักษณะรูปร่างของไมโครพลาสติกได้จำแนกออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ ฟิล์ม แผ่นชิ้นเล็ก เม็ด เส้นใย และไร้รูปแบบ จากผลการศึกษา พบว่า น้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต พบไมโครพลาสติกรูปร่างเส้นใยสูงที่สุด ร้อยละ 56.30 รองลงมาคือ ไร้รูปแบบ ร้อยละ 20.31 แผ่นชิ้นเล็ก ร้อยละ 13.60 ฟิล์ม ร้อยละ 6.43 และเม็ด ร้อยละ 3.36 ในเทศบาลเมืองป่าตอง พบไมโครพลาสติกรูปร่างเส้นใยสูงที่สุด ร้อยละ 41.64 รองลงมาคือ ไร้รูปแบบ ร้อยละ 23.27 แผ่นชิ้นเล็ก ร้อยละ 20.36 ฟิล์ม ร้อยละ 9.88 และเม็ด ร้อยละ 4.85 การศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า ลักษณะรูปร่างของไมโครพลาสติกที่พบจากสัดส่วนจากมากไปน้อย คือ เส้นใย ไร้รูปแบบ แผ่นชิ้นเล็ก ฟิล์ม และเม็ด ซึ่งสอดคล้องกันทั้งสองเขตพื้นที่

### 4. ชนิดของไมโครพลาสติก

ชนิดของไมโครพลาสติกที่พบในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตในทั้ง 2 พื้นที่และ 2 ฤดูกาล พบการปนเปื้อนทั้งหมด 46 ชนิด โดยชนิดที่พบปริมาณการปนเปื้อนสูงสุด 10 อันดับแรกของแต่ละเขตพื้นที่ พบว่าน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลนครภูเก็ต ฤดูร้อน พบการปนเปื้อนไมโครพลาสติกทั้งหมด 30 ชนิด พบการปนเปื้อนสูงสุด 5 อันดับแรก คือ เรยอน

(Rayon) ร้อยละ 24.40 รองลงมาคือ โพลีโพรพิลีน (PP) ร้อยละ 16.11 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ร้อยละ 10.93 โพลีสไตรีน (PS) ร้อยละ 9.21 โพลีเอทิลีน (PE) ร้อยละ 9.21 ขณะที่ฤดูฝน พบการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นเป็น 31 ชนิด พบการปนเปื้อนสูงสุด 5 อันดับแรก คือ เรยอน ร้อยละ 56.31 รองลงมาคือ โพลีสไตรีน ร้อยละ 10.30 โพลีเอทิลีน ร้อยละ 5.02 โพลีโพรพิลีน ร้อยละ 3.99 โพลีเบลนด์ (Polyblend) ร้อยละ 3.42 (ตารางที่ 1) ในน้ำผิวดินที่ไหลผ่านเขตเทศบาลเมืองป่าตอง ฤดูร้อน พบการปนเปื้อนทั้งหมด 28 ชนิด พบการปนเปื้อนสูงสุด 5 อันดับแรก คือ เรยอน ร้อยละ 21.83 รองลงมาคือ โพลีเอทิลีน ร้อยละ 13.62 โพลีโพรพิลีน ร้อยละ 11.75 โพลีสไตรีน ร้อยละ 8.40 และโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ร้อยละ 5.60 ขณะที่ฤดูฝน พบการปนเปื้อนเพิ่มขึ้น เป็น 36 ชนิด พบการปนเปื้อนสูงสุด 5 อันดับแรก คือ เรยอน ร้อยละ 25.58 รองลงมาคือ โพลีเอทิลีน ร้อยละ 9.96 โพลีไวนิลบิวไทรล (PVB) ร้อยละ 6.82 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 6.55 และโพลีสไตรีน ร้อยละ 6.19 (ตารางที่ 2)

**ตารางที่ 1** ชนิดของไมโครพลาสติกที่พบปริมาณการปนเปื้อนสูงสุด 10 อันดับแรกในพื้นที่เขตเทศบาล นครภูเก็ต (BY1–BY6) ในฤดูร้อนและฤดูฝน พ.ศ. 2567

| ลำดับ | ชนิดพอลิเมอร์     | เดือนฤดูร้อน (ชิ้น/ลิตร) |           |        | เดือนฤดูฝน (ชิ้น/ลิตร) |           |        |
|-------|-------------------|--------------------------|-----------|--------|------------------------|-----------|--------|
|       |                   | ผลรวม                    | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ | ผลรวม                  | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ |
| 1     | Rayon             | 21.20                    | 3.53      | 24.40  | 108.80                 | 18.13     | 56.31  |
| 2     | PS                | 8.00                     | 1.33      | 9.21   | 19.90                  | 3.32      | 10.30  |
| 3     | PE                | 8.00                     | 1.33      | 9.21   | 9.70                   | 1.62      | 5.02   |
| 4     | PP                | 14.00                    | 2.33      | 16.11  | 7.70                   | 1.28      | 3.99   |
| 5     | Nylon             | 5.80                     | 0.97      | 6.67   | 6.00                   | 1.00      | 3.11   |
| 6     | EPDM              | 9.50                     | 1.58      | 10.93  | 6.30                   | 1.05      | 3.26   |
| 7     | PTFE              | 2.70                     | 0.45      | 3.11   | -                      | -         | -      |
| 8     | PVB               | -                        | -         | -      | 2.80                   | 0.47      | 1.45   |
| 9     | Polyblend         | 2.70                     | 0.45      | 3.11   | 6.60                   | 1.10      | 3.42   |
| 10    | PVS               | -                        | -         | -      | 3.20                   | 0.53      | 1.66   |
| 11    | Synthetic leather | -                        | -         | -      | 5.80                   | 0.97      | 3.00   |
| 12    | PET               | 1.50                     | 0.25      | 1.73   | -                      | -         | -      |
| 13    | Polyester         | 2.60                     | 0.43      | 2.99   | -                      | -         | -      |
| 14    | อื่น ๆ            | 10.90                    | 1.82      | 12.54  | 16.40                  | 2.73      | 8.49   |

**ตารางที่ 2** ชนิดของไมโครพลาสติกที่พบปริมาณการปนเปื้อนสูงสุด 10 อันดับแรกในเขตเทศบาลเมืองป่าตอง (PT1-PT5) ในฤดูร้อนและฤดูฝน พ.ศ. 2567

| ลำดับ | ชนิดพอลิเมอร์     | เดือนฤดูร้อน (ชิ้น/ลิตร) |           |        | เดือนฤดูฝน (ชิ้น/ลิตร) |           |        |
|-------|-------------------|--------------------------|-----------|--------|------------------------|-----------|--------|
|       |                   | ผลรวม                    | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ | ผลรวม                  | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ |
| 1     | Rayon             | 11.70                    | 2.34      | 21.83  | 28.50                  | 5.70      | 25.58  |
| 2     | PS                | 4.50                     | 0.90      | 8.40   | 6.90                   | 1.38      | 6.19   |
| 3     | PE                | 7.30                     | 1.46      | 13.62  | 11.10                  | 2.22      | 9.96   |
| 4     | PP                | 6.30                     | 1.26      | 11.75  | 5.80                   | 1.16      | 5.21   |
| 5     | Nylon             | 2.90                     | 0.58      | 5.41   | 4.70                   | 0.94      | 4.22   |
| 6     | EPDM              | 1.80                     | 0.36      | 3.36   | -                      | -         | -      |
| 7     | PTFE              | 2.30                     | 0.46      | 4.29   | 6.80                   | 1.36      | 6.10   |
| 8     | PVB               | -                        | -         | -      | 7.60                   | 1.52      | 6.82   |
| 9     | PVS               | -                        | -         | -      | 5.30                   | 1.06      | 4.76   |
| 10    | Synthetic leather | 2.20                     | 0.44      | 4.10   | -                      | -         | -      |
| 11    | PVA               | -                        | -         | -      | 7.30                   | 1.46      | 6.55   |
| 12    | PET               | 3.00                     | 0.60      | 5.60   | -                      | -         | -      |
| 13    | Polyester         | 1.80                     | 0.36      | 3.36   | -                      | -         | -      |
| 14    | PVC               | -                        | -         | -      | 3.30                   | 0.66      | 2.96   |
| 15    | อื่น ๆ            | 9.80                     | 1.96      | 18.28  | 24.10                  | 4.82      | 21.63  |

### อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตพบว่า การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลส่งผลต่อการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณการปนเปื้อนในฤดูฝนสูงกว่าฤดูร้อนประมาณ 1.3-4.7 เท่า โดยในฤดูฝนพบการปนเปื้อนสูงสุดในพื้นที่ชุมชนเมือง อาจมีสาเหตุบางประการเกิดจากการไหลชะล้างของน้ำฝนที่พัดพาขยะพลาสติกและเศษวัสดุจากบริเวณริมตลิ่งและพื้นที่เขตเมืองลงสู่แหล่งน้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน [8] พลาสติกที่สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน เมื่อถูกพัดพาเข้าสู่แหล่งน้ำจะเกิดการเสื่อมสภาพและแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกขนาดเล็ก สามารถแขวนลอยและปะปนในแหล่งน้ำได้ง่าย จึงอาจเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้ระดับการปนเปื้อนไมโครพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ฤดูร้อนพบการปนเปื้อนสูงสุดบริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากในช่วงฤดูร้อนปริมาณน้ำในแหล่งน้ำผิวดินค่อนข้างน้อย น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนจะถูกรวบรวมผ่านระบบท่อระบายน้ำและลำเลียงเข้าสู่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผ่านกระบวนการบำบัด ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปสามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้บางส่วน ทำให้ไมโครพลาสติกบางส่วนปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้ง ระบบบำบัดน้ำเสียจึงมีบทบาทเป็นทั้งแหล่งรวบรวมและแหล่งแพร่กระจายไมโครพลาสติกลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน [16] และพบว่า

ชนิดหลักของไมโครพลาสติกที่พบทั้งสองพื้นที่ คือ เรยอน (Rayon) โพลีสไตรีน (PS) โพลีเอทิลีน (PE) และ โพลีโพรพิลีน (PP) ซึ่งเป็นชนิดของพลาสติกที่นิยมใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เสื้อผ้า บรรจุภัณฑ์อาหาร ภาชนะใช้แล้วทิ้ง และถุงพลาสติก ซึ่งเมื่อเสื่อมสภาพและแตกสลายจะกลายเป็นไมโครพลาสติกทุติยภูมิ [17]

ผลการศึกษาขนาดของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตพบว่าไมโครพลาสติกส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 50 มีขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  รองลงมาคือ ขนาด 100–300  $\mu\text{m}$  และไม่พบไมโครพลาสติกขนาดใหญ่กว่า 300  $\mu\text{m}$  เช่นเดียวกันทั้ง 2 พื้นที่และ 2 ฤดูกาล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินบางส่วนของประเทศไทย ถึงแม้การกำหนดช่วงขนาดของไมโครพลาสติกมีความแตกต่างกัน แต่โดยภาพรวมพบปริมาณการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาดเล็กสูงกว่าขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแม่น้ำเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี พบการปนเปื้อนสูงสุดขนาด 300–1,000  $\mu\text{m}$  รองลงมาคือ 1,100–5,000  $\mu\text{m}$  [18] ในคลองแม่ข่า จังหวัดเชียงใหม่ พบการปนเปื้อนสูงสุดขนาด 250–500  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 36.56 รองลงมาคือ ขนาด 100–250  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 35.48 [19] ในลำตะคอง เขตเทศบาลนคร จังหวัดนครราชสีมา พบการปนเปื้อนสูงสุดขนาด 20–200  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 72.31 และขนาด 200–2,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 27.69 [7] ในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงบอระเพ็ด จังหวัดนครสวรรค์ พบการปนเปื้อนสูงสุดขนาด 355–999  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 85.9 และขนาด 1,000–4,749  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 14.1 [9] และในลุ่มน้ำบางปะกง พบการปนเปื้อนขนาด 20–999  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 36.94 และพบขนาด 1,000–5,000  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 63.06 [10]

จากการอภิปรายในข้างต้นชี้ให้เห็นว่าในแหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต และแหล่งน้ำผิวดินพื้นที่อื่น ๆ ที่กล่าวมา กำลังเผชิญกับปัญหาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาดเล็กในสัดส่วนที่สูง ขณะที่การรายงานข้อมูลเกี่ยวกับการปนเปื้อนไมโครพลาสติกขนาดเล็กกว่า 100  $\mu\text{m}$  ในแหล่งน้ำผิวดินของประเทศไทยยังมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาที่ผ่านมาต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีโอกาสถูกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในแหล่งน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ตัวอ่อนปลา รวมถึงสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังบริโภคเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งอาจนำไปสู่การสะสมและการถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ [20] ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ให้มีขนาดที่เล็กลง และมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้ทราบถึงสถานการณ์การปนเปื้อนไมโครพลาสติกของแหล่งน้ำผิวดินในปัจจุบันของประเทศ ทั้งนี้ หลายงานวิจัยรายงานว่าไมโครพลาสติกขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) เพิ่มขึ้น และสามารถทำหน้าที่เป็นพาหะนำสารพิษเข้าสู่ร่างกาย [21] และเมื่อไมโครพลาสติกยึดเกาะและปะปนกับแพลงก์ตอน ซึ่งเป็นแหล่งอาหารสำคัญของสิ่งมีชีวิตในน้ำ หากสัตว์น้ำบริโภคเข้าไปอนุภาคไมโครพลาสติกเหล่านี้จะเข้าสู่ห่วงโซ่และถ่ายทอดไปตามลำดับขั้นของการบริโภคอาหารในระบบนิเวศต่อไป [5] แม้ว่าปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเชิงประจักษ์โดยตรงเกี่ยวกับกลไกการดูดซึมไมโครพลาสติกในมนุษย์แต่มีหลักฐานสนับสนุนให้เห็นว่าไมโครพลาสติกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ผ่านสามเส้นทางหลัก ได้แก่ การกลืนกิน การหายใจ และการสัมผัสผิวหนังโดยตรง สามารถพบไมโครพลาสติกขนาด 800 นาโนเมตร ถึง 5,000 ไมโครเมตร ได้ในร่างกายของมนุษย์ เช่น ตับ เลือด หัวใจ รก น้ำนมแม่ เสมหะ น้ำอสุจิ อัณฑะ ปัสสาวะ และในอุจจาระของมนุษย์ [22, 23] ซึ่ง

ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงการได้รับและการสะสมไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกขนาดเล็กในแหล่งน้ำผิวดิน เนื่องจากขนาดของไมโครพลาสติกนับเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดระดับความเสียหายและความเป็นพิษที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิต รวมทั้ง การพัฒนานวัตกรรมหรือเทคโนโลยีเพื่อลดการปล่อยไมโครพลาสติกตั้งแต่ต้นทาง ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

### สรุปผลการวิจัย

แหล่งน้ำผิวดินที่ไหลผ่านชุมชนในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต พบการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในทุกสถานี พบปริมาณการปนเปื้อนในฤดูฝนสูงกว่าฤดูร้อนประมาณ 1.3–4.7 เท่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการชะล้างของน้ำฝนและการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ไมโครพลาสติกส่วนใหญ่ที่พบมากกว่าร้อยละ 50 มีขนาด 30–100  $\mu\text{m}$  ชนิดพอลิเมอร์หลักที่พบ ได้แก่ เรยอน โพลีสไตรีน โพลีเอทิลีน และโพลีโพรพิลีน ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลส่งผลต่อการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ โดยในฤดูร้อนพบปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดบริเวณหลังจุดปล่อยน้ำทิ้งจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ ในขณะที่ฤดูฝนพบปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดในพื้นที่ชุมชนเมืองเช่นเดียวกันทั้ง 2 พื้นที่ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสะท้อนถึงความสำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกขนาดเล็กในแหล่งน้ำผิวดิน เนื่องจากขนาดของไมโครพลาสติกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระดับความเป็นพิษและความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์ ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวสามารถเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานส่วนท้องถิ่นจังหวัดภูเก็ตและพื้นที่อื่น ๆ ในการรับทราบสถานการณ์การปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดิน เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาแนวทางการบริหารจัดการขยะพลาสติกที่เหมาะสมกับพื้นที่ต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2567–2568 (รหัสโครงการ 204028) รวมทั้ง เทศบาลนครภูเก็ต และเทศบาลเมืองป่าตอง ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่ศึกษาและสนับสนุนการดำเนินการเก็บตัวอย่างภาคสนาม

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Prata, J. C., Silva, A. L. P., da Costa, J. P., Mouneyrac, C., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Solutions and integrated strategies for the control and mitigation of plastic and microplastic pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13), 2411.
- [2] Silva, A. L. P., Prata, J. C., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., Barceló, D., & Rocha-Santos, T. (2021). Microplastics in landfill leachates: The need for reconnaissance studies and remediation technologies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 3, 100072.

- [3] Ziani, K., Ioniță-Mîndrican, C.-B., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C., Moroșan, E., Drăgănescu, D., & Preda, O.-T. (2023). Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients*, 15(3), 617.
- [4] GESAMP. (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment. *GESAMP Reports & Studies Series*, 93, 220.
- [5] Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492.
- [6] Bhardwaj, L. K., Rath, P., Yadav, P., & Gupta, U. (2024). Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: A systematic review. *Environmental Systems Research*, 13, 8.
- [7] บุษราคัม ป้อมทอง, โยธิน สุริยะพงศ์, วัชรพร พรกวีรัตน์, มัตติกา ชัยมีแรง, มลธิยา วงศ์คำ, วาสนา อาจชัยภูมิ และชนกร วัชรปาณ. (2566). การศึกษาไมโครพลาสติกในลำตะคองเขตเทศบาลนคร จังหวัดนครราชสีมา. *วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา*, 8(1), 86–96.
- [8] ธนสินทร์ ่องอาจ และวัชรารภรณ์ ตันติพนาทิพย์. (2565). การปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในแหล่งน้ำผิวดินกรณีศึกษา คลองท่อ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 27(2), 1194–1211.
- [9] กนกวรรณ เนตรสิงแสง. (2563). การปนเปื้อนไมโครพลาสติก และปลาในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงบอระเพ็ด จังหวัดนครสวรรค์. *วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร*.
- [10] ชานนท์ นัยจิตร. (2565). ปริมาณและการกระจายตัวของไมโครพลาสติกในลุ่มน้ำบางปะกง. *วิทยานิพนธ์ สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- [11] Anh, T., & Babel, S. (2019). Microplastic pollution in surface water of the Chao Phraya River in Ang Thong area. *EnvironmentAsia*, 12(Special issue), 48–53.
- [12] Jiwarungrueangkul, T., Kongpuen, O., Sangmanee, C., Yucharoen, M., Tipmanee, D., Phongphattarawat, S., Buapet, P., & Sompongchaiyakul, P. (2024). Weekly variations of nutrients and their associations with phytoplankton blooms in the urban coastal waters of Andaman Sea coast: A case study in Patong Bay, Phuket, Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115824.
- [13] Jiwarungrueangkul, T., Phaksopa, J., Sompongchaiyakul, P., & Tipmanee, D. (2021). Seasonal microplastic variations in estuarine sediments from urban canal on the west coast of Thailand: A case study in Phuket province. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112452.
- [14] Stock, F., Kochleus, C., Bansch-Baltruschat, B., Brennholt, N., & Reifferscheid, G. (2019). Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 113, 84–92.

- [15] Limsakul, A., Naban, O., & Jiwarungrueangkul, T. (2025). Improved determination of small microplastics in the municipal solid waste leachates. In Proceedings of the 7<sup>th</sup> Environment Asia International Conference.
- [16] ชุตินันท์ บุญวัฒนา. (2566). การวิเคราะห์การปนเปื้อนไมโครพลาสติกในระบบบำบัดน้ำเสียและการศึกษาวิธีการกำจัดไมโครพลาสติกในระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [17] Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179.
- [18] อติสุตา ณ สงขลา, วัชรพงษ์ วาระรัมย์, อรอนงค์ ผิวนิล และนฤชิต คำปิ่น. (2567). ผลของกิจกรรมของมนุษย์ต่อการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในแม่น้ำเพชรบุรี. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ (JSTEL)*, 15(1), 64–75.
- [19] Pradit, S., Noppradit, P., Sengloyluan, K., Suwanno, P., Tanrattanakul, V., Sornplang, K., Nuthammachot, N., Jitkaew, P., & Nitiratsuan, T. (2023). Occurrence of microplastics in river water in Southern Thailand. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 90.
- [20] Al Mamun, A., Prasetya, T. A. E., Dewi, I. R., & Ahmad, M. (2023). Microplastics in human food chains: Food becoming a threat to health safety. *Science of The Total Environment*, 858, 159834.
- [21] Liu, S., Huang, J. H., Zhang, W., Shi, L. X., Yi, K. X., Yu, H. B., Zhang, C. Y., Li, S. Z., & Li, J. N. (2022). Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: A review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects. *Journal of Environmental Management*, 302, 113995.
- [22] Enyoh, C. E., Devi, A., Kadono, H., Wang, Q., & Rabin, M. H. (2023). The plastic within: Microplastics invading human organs and bodily fluids systems. *Environments*, 10(11), 194.
- [23] Winiarska, E., Jutel, M., & Zemelka-Wiacek, M. (2024). The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research*, 251(2), 118535.

## การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับเครื่องมือผ่าตัดโดยใช้ Faster R-CNN Design and Development of a Surgical Instrument Detection System using Faster R-CNN

โพธิ์ สินชู<sup>\*1</sup>, ชลัยรัตน์ อธิคุณหะวงศ์<sup>1</sup>, สุวนันท์ บัวรอด<sup>1</sup> และ ยุทธนา ปิติธีรภาพ<sup>2</sup>  
Po Sinchoo<sup>\*1</sup>, Chalairat Arthichoonhawong<sup>1</sup>, Suwanan Buarod<sup>1</sup>  
& Yutthana Pititheeraphab<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยคริสเตียน

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต

<sup>1</sup>Department of Biomedical Engineering, College of Health Sciences, Christian University of Thailand

<sup>2</sup>College of Biomedical Engineering, Rangsit University

Submitted 13/03/2026 ; Revised 16/04/2026 ; Accepted 23/04/2026

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องมือช่วยตรวจจับและนับอุปกรณ์ผ่าตัดด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เพื่อลดความผิดพลาดจากการนับด้วยมนุษย์และเพิ่มความถูกต้องในกระบวนการทำงานทางการแพทย์ อุปกรณ์ที่ศึกษา ได้แก่ กรรไกรผ่าตัด คีมมัดผ่าตัด และคีมหนีบ โดยใช้โมเดลตรวจจับวัตถุ Faster R-CNN บนโปรแกรม MATLAB เป็นแกนหลักของระบบกระบวนการวิจัยประกอบด้วยการจัดเตรียมชุดข้อมูลภาพและกำหนดป้ายกำกับของอุปกรณ์ผ่าตัด การแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกและการทดสอบ และการฝึกโมเดล Faster R-CNN เพื่อให้ระบบสามารถตรวจจับตำแหน่ง จำแนกประเภท และนับจำนวนอุปกรณ์ได้แบบอัตโนมัติ จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่ จำนวนและตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในภาพ รวมถึงลักษณะพื้นหลัง เพื่อประเมินความสามารถของระบบเมื่อสภาพแวดล้อมมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ผลการทดลอง พบว่าระบบสามารถตรวจจับและจำแนกประเภทอุปกรณ์ผ่าตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะเมื่อใช้พื้นหลังสีขาวซึ่งให้ความแม่นยำสูงอยู่ที่ 95% อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ในภาพหรือเปลี่ยนพื้นหลังเป็นสีเขียวยุติประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลง โดยเด่นชัดด้านความครบถ้วนในการตรวจจับและความถูกต้องในการนับ สะท้อนข้อจำกัดของโมเดลในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม และเป็นแนวทาง ต่อยอดสู่ระบบอัจฉริยะด้านการแพทย์ในอนาคต

**คำสำคัญ:** ปัญญาประดิษฐ์ อุปกรณ์ผ่าตัด การประมวลผลภาพ

**\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)**

E-mail: pohsinchoo@gmail.com

## Abstract

This study aims to design and develop an AI-based tool for detecting and counting surgical instruments to reduce human counting errors and improve accuracy in medical workflows. The target instruments include surgical scissors, scalpel handles, and forceps, and the proposed system uses a Faster R-CNN object detection model implemented in MATLAB as the core method. The research process includes preparing an image dataset, labeling the instruments, splitting the data into training and testing sets, and training the Faster R-CNN model so that the system can automatically localize, classify, and count instruments. The system is then evaluated under different conditions, including varying the number and positions of instruments in each image and changing background characteristics, to assess performance as the environment becomes more complex. Experimental results show that the system can effectively detect and classify surgical instruments, particularly with a white background, which yields a high accuracy rate of 95%. However, performance tends to decrease when more instruments are present in the image or when the background is changed to green, especially in terms of detection completeness and counting accuracy, reflecting the model's limitations under more challenging visual conditions. Overall, the developed system demonstrates potential for practical use in controlled environments and provides a foundation for the future development of intelligent medical systems.

**Keywords:** artificial intelligence, surgical instrument, image processing

## บทนำ

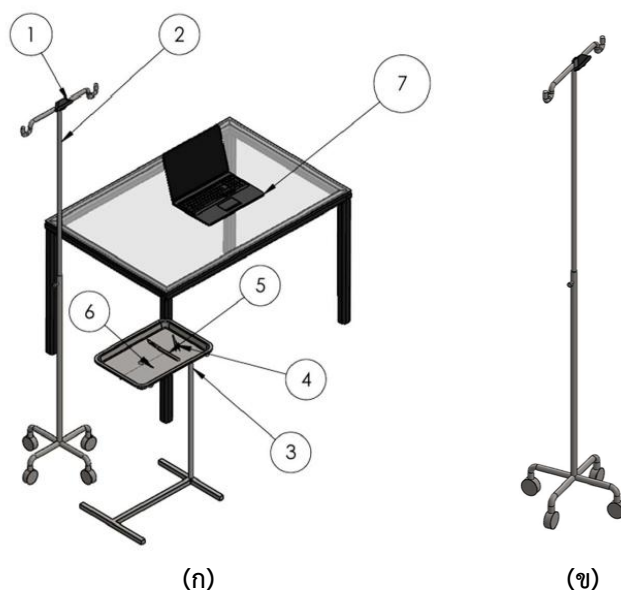
อุปกรณ์ผ่าตัดพื้นฐาน เช่น กรรไกรผ่าตัด ด้ามมีดผ่าตัด และคีมหนีบ เป็นเครื่องมือสำคัญในการดำเนินการผ่าตัดในทุกสาขาทางการแพทย์ ซึ่งต้องได้รับการตรวจสอบและจัดการอย่างถูกต้องทั้งก่อนและหลังการใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานด้านความปลอดภัยและลดความผิดพลาดในห้องผ่าตัด [1–3] จากการปฏิบัติงานจริงพบว่า การตรวจนับอุปกรณ์ด้วยวิธีดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานมนุษย์เพียงอย่างเดียวอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดคล่อง โดยเฉพาเมื่ออุปกรณ์มีรูปร่างคล้ายคลึงกันหรือถูกจัดวางในลักษณะที่บดบังกัน ทำให้การตรวจนับทำได้ยากและขาดความแม่นยำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้ป่วยและคุณภาพของกระบวนการผ่าตัดในภาพรวม [5–7] แม้ว่าจะมีการนำเทคโนโลยีด้านการจัดการอุปกรณ์หรือการตรวจสอบแบบกึ่งอัตโนมัติมาใช้ในบางโรงพยาบาล แต่ขั้นตอนดังกล่าวยังไม่สามารถรองรับการตรวจแยกอุปกรณ์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น กรรไกรผ่าตัดและคีมหนีบซึ่งมักถูกวางซ้อนกัน หรือด้ามมีดผ่าตัดที่มีรูปทรงแคบและถูกมองข้ามได้ง่ายในสภาพแสงที่ไม่เหมาะสม ความซับซ้อนของกระบวนการตรวจสอบเหล่านี้ทำให้บุคลากรทางการแพทย์ต้องใช้เวลา ความรอบคอบ และสมาธิสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของงานลดลงและเพิ่มโอกาสการเกิดข้อผิดพลาดที่มีผลต่อความปลอดภัยของผู้ป่วย นอกจากนี้ ข้อจำกัดดังกล่าวยังสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นของวิธีการตรวจสอบที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง แม่นยำ และลดการพึ่งพาการตรวจสอบด้วยมนุษย์เพียงอย่างเดียวซึ่งงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจนับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence; AI) เพื่อยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในการผ่าตัด ลดความเสี่ยงจากข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบเครื่องมือผ่าตัดให้มีความแม่นยำ รวดเร็ว และเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น โดยอาศัยการวิเคราะห์ภาพและการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) ในการจำแนกและระบุชนิดของอุปกรณ์ผ่าตัดจากภาพถ่าย ซึ่งจะช่วยลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์และสนับสนุนกระบวนการตรวจสอบให้เป็นไปอย่างมีระบบมากขึ้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในลักษณะดังกล่าวจึงถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาระบบสนับสนุนด้านความปลอดภัยในห้องผ่าตัด และสามารถนำไปต่อยอดเพื่อปรับปรุงกระบวนการจัดการอุปกรณ์ทางการแพทย์ในอนาคตได้อย่างเหมาะสม [8–10]

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาและออกแบบระบบตรวจนับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกและตรวจนับอุปกรณ์ผ่าตัด
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบตรวจนับอัตโนมัติ โดยพิจารณาความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเสถียรในการตรวจนับอุปกรณ์ผ่าตัด

## วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจนับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ผ่านโปรแกรม Solidworks [4] ขั้นตอนแรกเริ่มต้นที่ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และออกแบบโครงสร้างเครื่องแสดงดังภาพที่ 1ก



ภาพที่ 1 (ก) เครื่องตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด (ข) เสาตั้งกล้องสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับ

กำหนดให้หมายเลข ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 กล้อง OKER รุ่น HD-T566

หมายเลข 2 เสาตั้งกล้อง

หมายเลข 3 โต๊ะสำหรับวางอุปกรณ์ผ่าตัด

หมายเลข 4 Forceps

หมายเลข 5 Surgical scalpel

หมายเลข 6 Surgical scissors

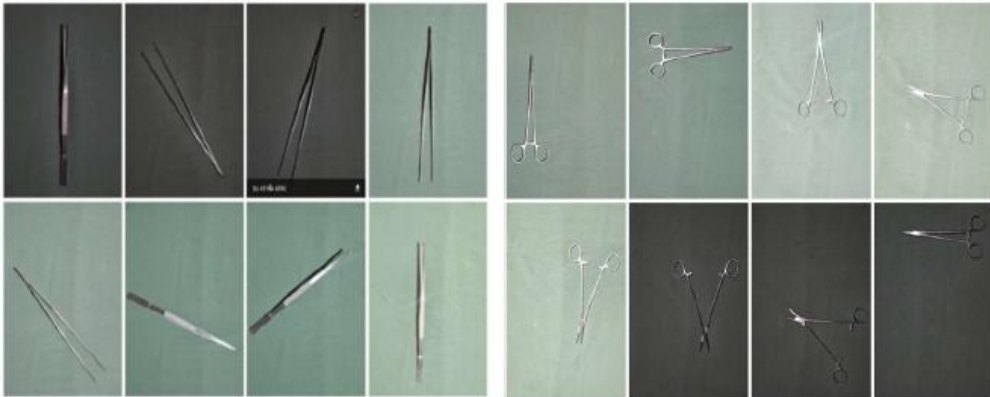
หมายเลข 7 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

จากภาพที่ 1ข คือ การออกแบบเสาตั้งกล้องสำหรับอุปกรณ์ตรวจจับ รูปแบบตั้งพื้นพร้อมล้อช่วยให้สามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งกล้องได้สะดวกโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ เหมาะกับการทดลองหลายสภาพแวดล้อม และยังช่วยลดการสั่นสะเทือนเมื่อทำการบันทึกภาพโครงสร้างเสาที่ปรับระดับความสูงได้ทำให้สามารถควบคุมระยะห่างระหว่างกล้องกับอุปกรณ์ผ่าตัดได้อย่างแม่นยำและคงที่ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความถูกต้องของข้อมูลภาพในการฝึกและทดสอบโมเดลปัญญาประดิษฐ์ การออกแบบให้มีจุดยึดกล้องที่มั่นคงและโครงสร้างแข็งแรงช่วยลดความคลาดเคลื่อนของมุมมองภาพ ส่งผลให้ระบบตรวจจับและจำแนกอุปกรณ์ผ่าตัดมีความเสถียรและความแม่นยำสูงขึ้น

การฝึกและการพัฒนาโมเดลสำหรับสร้างเครื่องตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ การฝึกและพัฒนาโมเดลตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามกระบวนการอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้โมเดลที่สามารถเรียนรู้ลักษณะของอุปกรณ์ผ่าตัดจากข้อมูลภาพจริงและนำไปใช้ในการทดสอบได้อย่างเหมาะสม กระบวนการดังกล่าวครอบคลุมตั้งแต่การจัดเตรียมข้อมูลภาพ การกำหนดป้ายกำกับข้อมูล การฝึกโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยโมเดล Faster R-CNN ไปจนถึงการบันทึกโมเดลที่ผ่านการฝึกสำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการทดสอบ

### การเก็บรวบรวมข้อมูลภาพ (image acquisition)

ดำเนินการบันทึกภาพอุปกรณ์ผ่าตัด 3 ประเภท ได้แก่ กรรไกรผ่าตัด คีมมิดผ่าตัด และ คีมหนีบโดยใช้กล้อง OKER รุ่น HD-T566 ภายใต้สภาพแวดล้อมการทดลองที่ควบคุมได้ กำหนดเงื่อนไขการถ่ายภาพให้มีความหลากหลาย เช่น ระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ และรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ เพื่อให้ข้อมูลภาพสะท้อนลักษณะการใช้งานจริง ภาพทั้งหมดถูกจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ดิจิทัล จำนวน 606 ภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็น 202 ภาพต่อ 1 เครื่องมือ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างชุดข้อมูลสำหรับการฝึกโมเดล แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลภาพอุปกรณ์ผ่าตัดหลังการเตรียมและคัดเลือกข้อมูล

### การฝึกโมเดลตรวจจำวัตถุ (model training)

ดำเนินการฝึกโมเดลตรวจจำวัตถุโดยใช้สถาปัตยกรรม Faster R-CNN ร่วมกับโครงข่าย ResNet-18 เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสกัดคุณลักษณะของภาพ การฝึกโมเดลดำเนินการแบบฝึกตั้งแต่เริ่มต้น (training from scratch) โดยไม่ใช้ค่าน้ำหนักที่ผ่านการฝึกมาก่อน กำหนดพารามิเตอร์การฝึก ได้แก่ การทดสอบทั้งหมด 112 รอบ จากจำนวนรูปภาพทั้งหมด 606 ภาพ

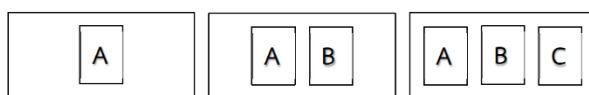
### ผลการวิจัย

ผลการทดลองของระบบตรวจจำอุปกรณ์ผ่าตัดที่พัฒนาด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้โมเดล Faster R-CNN ร่วมกับโครงข่าย ResNet-18 เป็นโครงสร้างพื้นฐาน ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณจากค่าตัวชี้วัดมาตรฐานของงานตรวจจำวัตถุ และในเชิงคุณภาพจากภาพผลลัพธ์การตรวจจำเพื่อสะท้อนประสิทธิภาพและข้อจำกัดของระบบภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนด

### ผลการทดสอบเครื่องตรวจจำอุปกรณ์ผ่าตัดโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจำอุปกรณ์ผ่าตัดในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบที่แยกออกจากชุดฝึกและชุดตรวจสอบตามขั้นตอนที่อธิบายไว้ในวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยทำการประเมินผลภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันทั้งในด้านจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์และสีพื้นหลังของภาพ เพื่อศึกษาความสามารถของระบบในการตรวจจำและนับจำนวนอุปกรณ์ผ่าตัด ได้แก่

คีมหนีบ กรรไกรผ่าตัด และด้ามมีดผ่าตัด ในสภาพแวดล้อมที่มีระดับความซับซ้อนแตกต่างกัน ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 6 โดยกำหนดให้แต่ละเงื่อนไขทำการทดสอบซ้ำจำนวน 20 รอบ ในตำแหน่งการวางอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน (ตำแหน่ง a-c) เพื่อสะท้อนความเสถียรของระบบในการทำงาน จากผลการทดสอบภายใต้พื้นหลังสีขาว (ตารางที่ 1-3) พบว่าระบบสามารถตรวจจับอุปกรณ์ได้ในระดับที่น่าพอใจเมื่อจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์มีน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนตำแหน่งการวางเป็น 2 และ 3 ตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 3 ความผิดพลาดในการตรวจจับและการนับจำนวนอุปกรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของกรรไกรผ่าตัด ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเรียวยาวและใกล้เคียงกับคีมหนีบ ส่งผลให้โมเดลเกิดความสับสนในการจำแนกประเภทอุปกรณ์เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการทดสอบเป็นพื้นหลังสีเขียวย (ตารางที่ 4-6)



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการวางอุปกรณ์ผ่าตัดตำแหน่ง A B C ในพื้นหลังสีขาวและพื้นหลังสีเขียวย

จากตารางที่ 1 พบว่าระบบสามารถตรวจจับคีมหนีบและด้ามมีดผ่าตัดได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยมีจำนวนการตรวจจับถูกต้องใกล้เคียงกับจำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม การตรวจจับกรรไกรมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยไม่สามารถตรวจจับได้ถูกต้องในทุกครั้งของการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 1 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| คีมหนีบ    |            | กรรไกร     |            | มีดผ่าตัด  |            |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| นับถูกต้อง | นับผิดพลาด | นับถูกต้อง | นับผิดพลาด | นับถูกต้อง | นับผิดพลาด |
| A          | A          | A          | A          | A          | A          |
| 10         | 10         | 0          | 20         | 10         | 10         |

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์เป็น 2 ตำแหน่ง ความถูกต้องในการตรวจจับของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะในกรณีของกรรไกร ซึ่งไม่สามารถตรวจจับได้ถูกต้องในทุกตำแหน่ง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 2 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| คีมหนีบ    |    |            |   | กรรไกร     |   |            |    | มีดผ่าตัด  |    |            |   |
|------------|----|------------|---|------------|---|------------|----|------------|----|------------|---|
| นับถูกต้อง |    | นับผิดพลาด |   | นับถูกต้อง |   | นับผิดพลาด |    | นับถูกต้อง |    | นับผิดพลาด |   |
| A          | B  | A          | B | A          | B | A          | B  | A          | B  | A          | B |
| 9          | 12 | 11         | 8 | 0          | 0 | 20         | 20 | 12         | 11 | 8          | 9 |

จากตารางที่ 3 พบว่าการเพิ่มตำแหน่งการวางอุปกรณ์เป็น 3 ตำแหน่ง ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่มีรูปร่างยาวและมีลักษณะใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 3 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| คิมหนีบ    |    |    |            |   |   | กรรไกร     |   |    |            |    |    | มีดผ่าตัด  |    |    |            |    |    |
|------------|----|----|------------|---|---|------------|---|----|------------|----|----|------------|----|----|------------|----|----|
| นับถูกต้อง |    |    | นับผิดพลาด |   |   | นับถูกต้อง |   |    | นับผิดพลาด |    |    | นับถูกต้อง |    |    | นับผิดพลาด |    |    |
| A          | B  | C  | A          | B | C | A          | B | C  | A          | B  | C  | A          | B  | C  | A          | B  | C  |
| 7          | 12 | 13 | 13         | 8 | 7 | 13         | 4 | 12 | 7          | 16 | 16 | 9          | 10 | 10 | 11         | 10 | 10 |

จากตารางที่ 4 พบว่าเมื่อเปลี่ยนสีพื้นหลังเป็นสีเขียว ความถูกต้องในการตรวจจับของระบบลดลงเมื่อเทียบกับพื้นหลังสีขาว โดยเฉพาะในกรณีของกรรไกรซึ่งไม่สามารถตรวจจับได้ถูกต้องในทุกครั้งของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสีพื้นหลังของภาพมีผลต่อคุณลักษณะเชิงภาพที่โมเดลใช้ในการจำแนกอุปกรณ์ผ่าตัด และอาจส่งผลให้เกิดการตรวจจับผิดพลาดหรือการตรวจจับเกินได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 1 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| คิมหนีบ    |  | กรรไกร     |  | มีดผ่าตัด  |  |
|------------|--|------------|--|------------|--|
| นับถูกต้อง |  | นับผิดพลาด |  | นับถูกต้อง |  |
| A          |  | A          |  | A          |  |
| 6          |  | 14         |  | 13         |  |
|            |  | 0          |  | 7          |  |

จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มทั้งจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์และเปลี่ยนสีพื้นหลังความแม่นยำของระบบลดลงอย่างชัดเจน โดยพบความผิดพลาดในการตรวจจับเพิ่มขึ้นในทุกประเภทอุปกรณ์ สภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 2 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| คิมหนีบ    |   |            |    | กรรไกร     |   |            |    | มีดผ่าตัด  |   |            |    |
|------------|---|------------|----|------------|---|------------|----|------------|---|------------|----|
| นับถูกต้อง |   | นับผิดพลาด |    | นับถูกต้อง |   | นับผิดพลาด |    | นับถูกต้อง |   | นับผิดพลาด |    |
| A          | B | A          | B  | A          | B | A          | B  | A          | B | A          | B  |
| 8          | 3 | 12         | 17 | 0          | 0 | 20         | 20 | 17         | 5 | 3          | 15 |

จากตารางที่ 6 พบว่าภายใต้เงื่อนไขที่มีความซับซ้อนสูงสุด ทั้งในด้านจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์และสีพื้นหลัง ระบบมีอัตราการตรวจจับผิดพลาดและการตรวจจับเกินสูงสุด แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของโมเดลในการรับมือกับสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนสูง

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น ต่อ 3 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| คิมหนีบ    |    |   |            |   |    | กรรไกร     |   |   |            |    |    | มีดผ่าตัด  |    |   |            |   |    |
|------------|----|---|------------|---|----|------------|---|---|------------|----|----|------------|----|---|------------|---|----|
| นับถูกต้อง |    |   | นับผิดพลาด |   |    | นับถูกต้อง |   |   | นับผิดพลาด |    |    | นับถูกต้อง |    |   | นับผิดพลาด |   |    |
| A          | B  | C | A          | B | C  | A          | B | C | A          | B  | C  | A          | B  | C | A          | B | C  |
| 4          | 15 | 7 | 16         | 5 | 13 | 0          | 0 | 0 | 20         | 20 | 20 | 17         | 12 | 9 | 3          | 8 | 11 |

### การวิเคราะห์ผลการทดลองและประสิทธิภาพของระบบตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด

การวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อนี้พิจารณาจากค่าตัวชี้วัดเชิงสถิติหลัก ได้แก่ true positive rate (TPR), precision (ความเที่ยงตรง), recall (ความครบถ้วน), accuracy (ความแม่นยำ) และ F1-score โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7-12 ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันทั้งจำนวนตำแหน่งการวางอุปกรณ์ผ่าตัดในภาพ (1-3 ตำแหน่ง) และลักษณะพื้นหลังของภาพ (พื้นหลังสีขาวและพื้นหลังสีเขียว) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความซับซ้อนของฉากต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับ ทั้งนี้การแปลผลค่าทางสถิติพิจารณาร่วมกับผลการนับ “นับถูกต้อง/นับผิดพลาด” เพื่อสะท้อนการทำงานของระบบอย่างครบถ้วนทั้งด้านการจำแนกชนิดและความถูกต้องของจำนวนที่ตรวจจับได้จากผลการทดลอง พบว่าค่า precision มีค่าสูงมากในทุกเงื่อนไขการทดสอบ (100.00%) สะท้อนว่ากรอบการตรวจจับที่ระบบรายงานเมื่อผ่านเกณฑ์คะแนนความเชื่อมั่นสามารถจำแนกชนิดของอุปกรณ์ผ่าตัดได้ถูกต้องทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ค่า precision ที่สูงไม่ได้หมายความว่าระบบสามารถตรวจจับอุปกรณ์ได้ครบถ้วนหรือมีความถูกต้องเชิงการนับในทุกกรณี โดยเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า recall, accuracy และ TPR พบว่า ยังคงมีบางสถานการณ์ที่ระบบไม่สามารถตรวจจับอุปกรณ์ได้ครบทุกตำแหน่ง โดยเฉพาะกรณีที่อุปกรณ์มีการจัดวางใกล้กัน เกิดการทับซ้อน หรือมีฉากหลังที่ทำให้ขอบวัตถุแยกจากพื้นหลังได้ยาก

ภายใต้เงื่อนไขพื้นหลังสีขาว (ตารางที่ 7-9) ระบบแสดงประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับสูง โดยค่า recall, accuracy และ F1-score มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนตำแหน่งเพิ่มจาก 1 เป็น 3 ตำแหน่ง สะท้อนว่าระบบสามารถตรวจจับตำแหน่งของอุปกรณ์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าการเพิ่มจำนวนตำแหน่งยังส่งผลให้เกิดการตรวจจับซ้ำ (duplicate detection) ในบางกรณี ซึ่งกระทบต่อความถูกต้องเชิงการนับ แม้ว่าค่าตัวชี้วัดเชิงสถิติจะอยู่ในระดับสูงก็ตาม ในขณะที่กรณีพื้นหลังสีเขียว (ตารางที่ 10-12) ค่า recall, accuracy และ TPR ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มจำนวนตำแหน่งเป็น 2 และ 3 ตำแหน่ง สะท้อนว่าความซับซ้อนของฉากและลักษณะพื้นหลังมีผลต่อความสามารถของโมเดลในการแยกคุณลักษณะของอุปกรณ์ออกจากฉากหลัง ส่งผลให้เกิดทั้งการตรวจจับไม่ครบถ้วนและการตรวจจับซ้ำในบางตำแหน่ง แม้ค่า precision จะยังคงอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้ ค่า TNR ที่มีค่าเป็น 0.00% ในทุกเงื่อนไขเกิดจากชุดข้อมูลทดสอบที่ประกอบด้วยภาพซึ่งมีอุปกรณ์ผ่าตัดอยู่จริงทั้งหมด

จากตารางที่ 7 พบว่าระบบมีค่า TPR เท่ากับ 90.00% แสดงว่าสามารถให้ผลการตรวจจับระดับภาพเป็น “ถูกต้อง” ได้ในภาพส่วนใหญ่ภายใต้เงื่อนไขที่มีความซับซ้อนต่ำ ค่า precision เท่ากับ 100.00% สะท้อนความถูกต้องของการจำแนกชนิด ขณะที่ค่า recall และ accuracy ที่ 90.00% แสดงว่ายังมีบางกรณีที่ระบบตรวจจับไม่ครบถ้วน ส่งผลให้ค่า F1-score อยู่ในระดับสูง

**ตารางที่ 7** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 1 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True positive rate (TPR) | 90.00         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 90.00         |
| Accuracy                 | 90.00         |
| F1-score                 | 94.74         |

จากตารางที่ 8 พบว่าค่า TPR, recall และ accuracy เพิ่มขึ้นเป็น 91.67% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนตำแหน่งช่วยให้ระบบตรวจจับอุปกรณ์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม จากผลการนับยังพบการตรวจจับซ้ำในบางตำแหน่ง ส่งผลให้ความถูกต้องเชิงการนับอาจไม่สมบูรณ์ แม้ค่า F1-score จะอยู่ในระดับสูง

**ตารางที่ 8** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 2 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True positive rate (TPR) | 91.67         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 91.67         |
| Accuracy                 | 91.67         |
| F1-score                 | 95.65         |

จากตารางที่ 9 พบว่าระบบมีค่า TPR, recall และ accuracy เท่ากับ 95.00% และ ค่า F1-score เท่ากับ 97.44% แสดงถึงประสิทธิภาพที่สูงมากในการตรวจจับระดับภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการนับและภาพตัวอย่าง ยังพบการตรวจจับซ้ำในบางกรณี สะท้อนว่าค่าทางสถิติควรพิจารณาควบคู่กับการนับจริง

**ตารางที่ 9** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 3 ตำแหน่ง พื้นหลังสีขาว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True positive rate (TPR) | 95.00         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 95.00         |
| Accuracy                 | 95.00         |
| F1-score                 | 97.44         |

จากตารางที่ 10 พบว่า ค่า TPR, recall และ accuracy ลดลงเหลือ 55.00% ภายใตพื้นหลังสีเขียว แม้ค่า precision จะยังคงเท่ากับ 100.00% แสดงว่าระบบยังจำแนกชนิดได้ถูกต้อง แต่ไม่สามารถตรวจจับอุปกรณ์ได้ครบถ้วน ส่งผลให้ค่า F1-score ลดลงอย่างชัดเจน

**ตารางที่ 10** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 1 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True positive rate (TPR) | 55.00         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 55.00         |
| Accuracy                 | 55.00         |
| F1-score                 | 70.97         |

จากตารางที่ 11 พบว่า ค่า TPR, recall และ accuracy เพิ่มขึ้นเป็น 61.67% เมื่อเพิ่มจำนวนตำแหน่งเป็น 2 ตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวยังอยู่ในระดับปานกลาง สะท้อนว่าพื้นหลังสีเขียวยังคงเป็นปัจจัยที่กระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ

**ตารางที่ 11** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 2 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True Positive Rate (TPR) | 61.67         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 61.67         |
| Accuracy                 | 61.67         |
| F1-score                 | 76.29         |

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่า TPR, recall และ accuracy ลดลงเหลือ 58.33% เมื่อเพิ่มจำนวนตำแหน่งเป็น 3 ตำแหน่งภายใต้พื้นหลังสีเขียว แสดงให้เห็นว่าความซับซ้อนของฉากส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ แม้ค่า precision จะยังคงอยู่ในระดับสูง

**ตารางที่ 12** การวิเคราะห์ผลการทดลองอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้น 3 ตำแหน่ง พื้นหลังสีเขียว

| ค่าทางสถิติ              | ค่าที่ได้ (%) |
|--------------------------|---------------|
| True positive rate (TPR) | 58.33         |
| Precision                | 100.00        |
| Recall                   | 58.33         |
| Accuracy                 | 58.33         |
| F1-score                 | 73.68         |

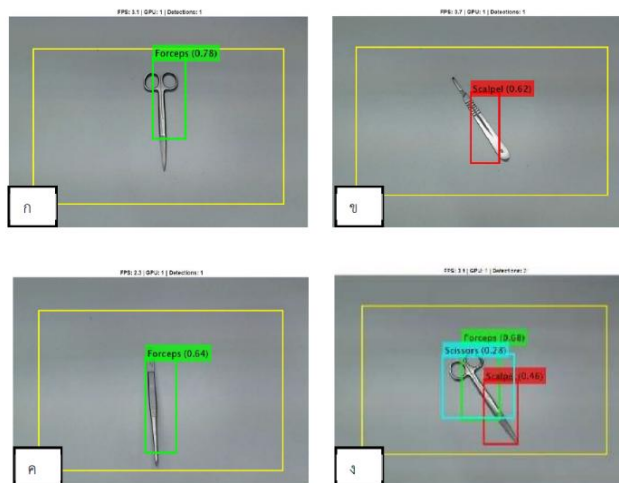
#### ตัวอย่างและการวิเคราะห์เชิงภาพของผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด

เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของภาพทดสอบ สภาพแวดล้อมในการทดลอง และพฤติกรรมการทำงานของโมเดลตรวจจับอย่างเป็นรูปธรรม การนำเสนอผลในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถอธิบายได้ทั้งกรณีที่ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และกรณีที่เกิดข้อผิดพลาดหรือข้อจำกัดของโมเดล ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้จากค่าทางสถิติเพียงอย่างเดียว

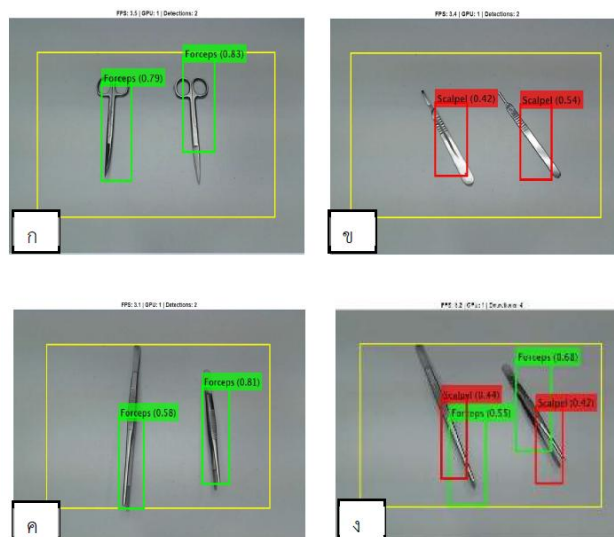
#### การวิเคราะห์ผลการตรวจจับจากภาพพื้นหลังสีขาว

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงสถิติในระบบตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัดให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ภาพที่มีพื้นหลังสีขาว โดยเฉพาะในด้านความถูกต้องในการตรวจจับและความครบถ้วนในการตรวจจับวัตถุ ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับสูงอย่างสม่ำเสมอในทุกเงื่อนไขของจำนวนตำแหน่งอุปกรณ์ พื้นหลังสีขาวมีลักษณะเป็นฉากที่เรียบและมีความแตกต่างของสี (contrast) ชัดเจนเมื่อเทียบกับสีและพื้นผิวของอุปกรณ์ผ่าตัด ส่งผลให้โมเดลสามารถแยกคุณลักษณะเชิงภาพของอุปกรณ์ออกจากฉากหลังได้ง่าย ลดความสับสนระหว่างวัตถุกับพื้นหลัง และช่วยให้การระบุตำแหน่งกรอบตรวจจับมีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ จากภาพตัวอย่างในรูปที่ 1 พบว่าการตรวจจับเกิน (false positive) เกิดขึ้นในระดับต่ำมาก ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการทำนายมีค่าสูงในทุกกรณีการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 7-9 อย่างไรก็ตาม ยังคงพบความคลาดเคลื่อนในบางกรณี โดยเฉพาะเมื่ออุปกรณ์มีการจัด

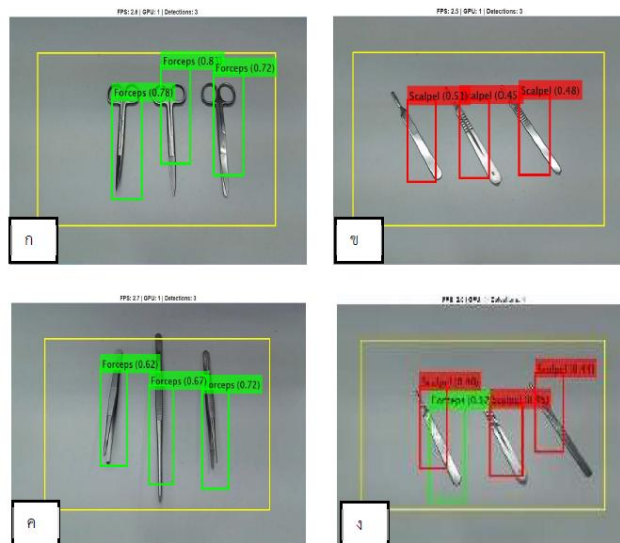
วางใกล้กันหรือเกิดการทับซ้อน ส่งผลให้เกิดการตรวจจับซ้ำหรือการระบุตำแหน่งกรอบตรวจจับคลาดเคลื่อนในบางตำแหน่ง แสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 1 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีขาว (ก) การตรวจจับกรรไกร 1 ชิ้นที่ผลิตพลาสติก (ข) การตรวจจับคีมมัด 1 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 1 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด



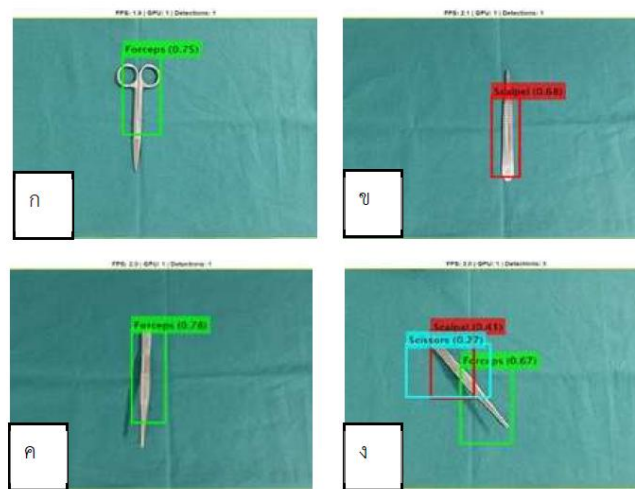
ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 2 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีขาว (ก) การตรวจจับกรรไกร 2 ชิ้นที่ผลิตพลาสติก (ข) การตรวจจับคีมมัด 2 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 2 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด



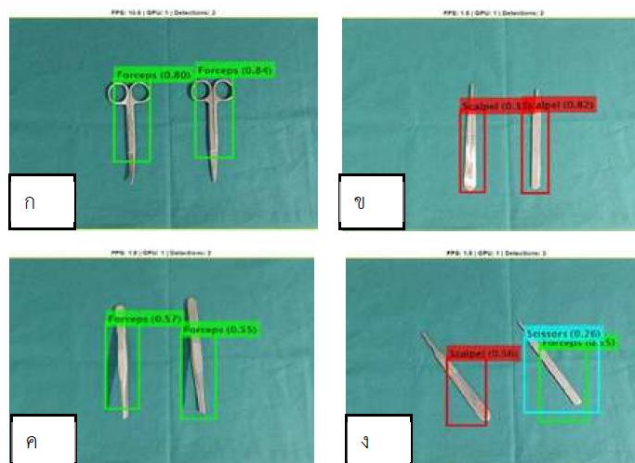
ภาพที่ 6 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 3 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีขาว (ก) การตรวจจับกรรไกร 3 ชิ้นที่ผิดพลาด (ข) การตรวจจับคีมมีด 3 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 3 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด

### การวิเคราะห์ผลการตรวจจับจากภาพพื้นหลังสีขาว

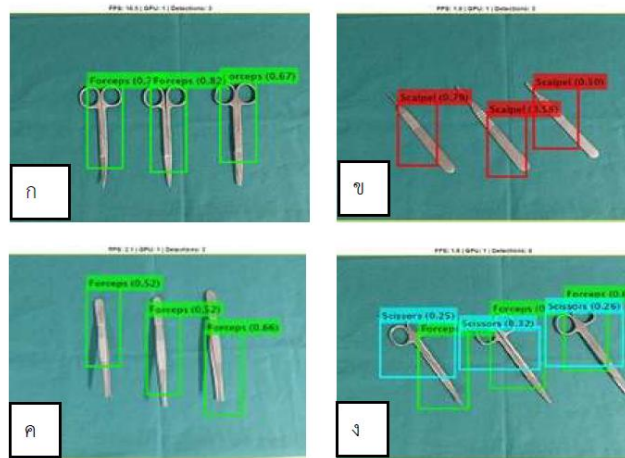
ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีพื้นหลังสีขาว โดยเฉพาะในด้านการครบถ้วนของการตรวจจับและความถูกต้องโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับค่าทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 10-12 แม้ว่าค่าความแม่นยำในการทำนายจะยังคงอยู่ในระดับสูงก็ตามสาเหตุสำคัญของการลดลงของประสิทธิภาพมาจากลักษณะของพื้นหลังสีขาวที่มีโทนสีและค่าความเข้มใกล้เคียงกับบางส่วนของอุปกรณ์ผ่าตัด รวมถึงผลกระทบจากการสะท้อนแสงบนพื้นผิวโลหะของอุปกรณ์ ส่งผลให้โมเดลไม่สามารถแยกขอบเขตของวัตถุออกจากฉากหลังได้อย่างชัดเจนในบางกรณีจากภาพตัวอย่างพบทั้งกรณีการตรวจจับไม่ครบถ้วน (false negative) และการตรวจจับซ้ำในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะเมื่อมีการจัดวางอุปกรณ์หลายตำแหน่งในภาพเดียวกัน ทำให้จำนวนการตรวจจับที่รายงานไม่สอดคล้องกับจำนวนอุปกรณ์จริง ผลการวิเคราะห์เชิงภาพดังกล่าวสอดคล้องกับผลการนับจำนวนในหัวข้อ 4.1 ซึ่งพบว่าอัตราการนับผิดพลาดเพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขพื้นหลังสีขาว และอธิบายได้ว่าค่าความครบถ้วนในการตรวจจับและค่า F1-score ในหัวข้อ 4.2 มีแนวโน้มลดลงเมื่อสภาพแวดล้อมมีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนข้อจำกัดของโมเดล Faster R-CNN ภายใต้ฉากหลังที่มีความแปรปรวนสูงและชี้ให้เห็นแนวทางในการปรับปรุงระบบในงานวิจัยต่อไป แสดงดังภาพที่ 7-9



ภาพที่ 7 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 1 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีเขียว (ก) การตรวจจับกรรไกร 1 ชิ้นที่ผลิตพลาสติก (ข) การตรวจจับด้ามมีด 1 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 1 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด



ภาพที่ 8 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 2 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีเขียว (ก) การตรวจจับกรรไกร 2 ชิ้นที่ผลิตพลาสติก (ข) การตรวจจับด้ามมีด 2 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 2 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด



ภาพที่ 9 ตัวอย่างผลการตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัด 1 ชิ้นต่อ 3 ตำแหน่ง บนพื้นหลังสีเขียว (ก) การตรวจจับกรรไกร 3 ชิ้นที่ผิดพลาด (ข) การตรวจจับด้ามมีด 3 ชิ้นที่ถูกต้อง (ค) การตรวจจับคีมหนีบ 3 ชิ้นที่ถูกต้อง (ง) การตรวจจับอุปกรณ์ได้ถูกต้องแต่ทำนายผลผิดพลาด

### อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาในการตีความผลการทดลองและการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริง ดังนี้ ประการแรก ชุดข้อมูลภาพที่ใช้ในการฝึกและทดสอบโมเดลยังมีความหลากหลายจำกัด ทั้งในด้านลักษณะพื้นหลังและสภาพแวดล้อมการถ่ายภาพ เนื่องจากการเก็บภาพอุปกรณ์ผ่าตัดในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับห้องผ่าตัดจริงมีข้อจำกัดด้านสถานที่ ความปลอดภัย และข้อกำหนดทางการแพทย์ ส่งผลให้โมเดลมีประสิทธิภาพสูงในกรณีพื้นหลังสีขาว แต่ประสิทธิภาพลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนเป็นพื้นหลังสีเขียว

ประการที่สอง สภาพแสงในห้องปฏิบัติการทั่วไปแตกต่างจากสภาพแสงในห้องผ่าตัดจริงอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสงในห้องผ่าตัดมีความเข้มสูงและมีทิศทางเฉพาะ ส่งผลให้เกิดการสะท้อนของแสงบนพื้นผิวโลหะของอุปกรณ์ผ่าตัด การสะท้อนดังกล่าวอาจบดบังลักษณะสำคัญของวัตถุ และทำให้ลักษณะภาพที่โมเดลเรียนรู้แตกต่างจากข้อมูลที่ใช้ฝึก ส่งผลต่อความแม่นยำในการตรวจจับและการระบุขอบเขตของกรอวัตถุ

ประการที่สาม การทดลองในงานวิจัยนี้พิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่จำนวนอุปกรณ์ในภาพยังอยู่ในระดับจำกัด แม้จะมีการทดสอบหลายตำแหน่ง แต่ยังไม่ครอบคลุมกรณีที่มีอุปกรณ์จำนวนมาก การทับซ้อนกันอย่างซับซ้อน หรือการบังกันในระดับที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์ใช้งานจริงในห้องผ่าตัด ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงเมื่อความซับซ้อนของฉากเพิ่มขึ้น

ประการสุดท้าย งานวิจัยนี้ใช้โมเดล Faster R-CNN เพียงรูปแบบเดียว และฝึกโมเดลจากชุดข้อมูลที่เตรียมขึ้นเฉพาะ โดยยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับโมเดลตรวจจับวัตถุประเภทอื่น หรือการปรับแต่งโครงสร้างโมเดลในหลายรูปแบบ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้เป็นหลัก

## สรุปผลการวิจัย

ระบบตรวจจับอุปกรณ์ผ่าตัดที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและแสดงศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตรวจจับและการนับอุปกรณ์ผ่าตัดในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมได้จริง ทั้งนี้ ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงระบบในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นภวรี จันทวงศ์. (2559). เครื่องมือผ่าตัดทางสูติศาสตร์และนรีเวช [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://w1.med.cmu.ac.th/obgyn/lecturestopics/topic-review/4581/> (25 มกราคม 2568).
- [2] สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์. (2564). ปัญญาประดิษฐ์ในการให้บริการของภาครัฐ [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.etda.or.th/Useful-Resource/Knowledge-Sharing/Articles/AI-in-Government-Services.aspx> (25 มกราคม 2568).
- [3] Ahmed, F. A., Yousef, M., Ahmed, M. A., Ali, H. O., Mahboob, A., Ali, H., Shah, Z., Aboumarzouk, O., Al Ansari, A., & Balakrishnan, S. (2025). Deep learning for surgical instrument recognition and segmentation in robotic-assisted surgeries: A systematic review. *Artificial Intelligence Review*, 58(1), 1–31.
- [4] Dassault Systèmes. (2026). SOLIDWORKS 2026 [Software]. [online], retrieved from <https://www.solidworks.com> (28 มกราคม 2568).
- [5] Deol, E. S., Henning, G., Basourakos, S., Vasdev, R. M. S., Sharma, V., Kavoussi, N. L., Karnes, R. J., Leibovich, B. C., Boorjian, S. A., & Khanna, A. (2024). Artificial intelligence model for automated surgical instrument detection and counting: An experimental proof-of-concept study. *Patient Safety in Surgery*, 18(24), 1–8.
- [6] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4<sup>th</sup> ed.). Pearson Education.
- [7] Hfocus. (2562). แนว 6 วิธีลดสิ่งแปลกปลอมตกค้างในร่างกายผู้ป่วยหลังผ่าตัด พร้อมเผยที่พบมากที่สุดคือผ้าก๊อช. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.hfocus.org/content/2019/09/17691> (28 มกราคม 2568).
- [8] Lelachaicharoeanpan, J., & Vongbunyong, S. (2021). Classification of surgical devices with artificial neural network approach (pp. 154–159). In 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST). IEEE.
- [9] Dynamic Intelligence Asia. (ม.ป.ป.). Machine learning และ deep learning คืออะไร เรียนรู้ต่างกันอย่างไร [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.dia.co.th/articles/machine-learning-vs-deep-learning/> (28 มกราคม 2568).
- [10] MathWorks. (2023). trainFasterRCNNObjectDetector. [online], retrieved from <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/trainfasterrcnnobjectdetector.html> (28 มกราคม 2568).

# การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดูด้วยแสง ซิงค์ออกไซด์ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

## Comparative Degradation Efficiency of Methylene Blue Using Zinc Oxide, Hydroxyapatite, and ZnO/Hydroxyapatite Photocatalysts Derived from *Lates Calcarifer* Bone Biomass

พรพนิต เกกينة<sup>1</sup>, อักษนีญา มะยิดา<sup>1</sup>, เนตนาปัด อ่องสุวรรณ<sup>2</sup> และ เสาวภา โชติสุวรรณ<sup>3</sup>

Pornpanit Kekina<sup>1</sup>, Akhniya Mayida<sup>1</sup>, Netnapid Ongsuwan<sup>2</sup>

& Saowapa Chotisuwan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาเคมี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

<sup>1</sup>Chemistry Program, Faculty of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus

<sup>2</sup>Department of Food Science and Nutrition, Faculty of Science and Technology,  
Prince of Songkla University, Pattani Campus

<sup>3</sup>Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University,  
Pattani Campus

Submitted 06/04/2026 ; Revised 05/05/2026 ; Accepted 08/05/2026

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว การสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่มีซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการโซล-เจลและใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวให้ความเสถียร ตรวจสอบลักษณะเฉพาะและสัณฐานวิทยา รวมถึงองค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์ นาโนซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน พบว่าผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์มีรูปแบบเฮกซะโกนัล มีหมู่ฟังก์ชันสำคัญที่ผิวคือไฮดรอกซิลและฟอสเฟต อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.64 และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ นาโนซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดูด้วยแสงยูวี-ซี (4 วัตต์) เป็นเวลา 180 นาที พบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูสูงกว่านาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยเมื่อความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเท่ากับ 5 และ 20 พีพีเอ็ม การสลายเมทิลีนบลูอยู่ที่ร้อยละ  $43.74 \pm 0.13$  และ  $44.13 \pm 0.59$  ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** ไฮดรอกซีอะพาไทต์ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ การสลายเมทิลีนบลู โฟโตคะตะไลซิส

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: saowapa.c@psu.ac.th

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดูด้วยแสง ซิงค์ออกไซด์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

## Abstract

This research investigated the synthesis of hydroxyapatite from *Lates calcarifer* bone biomass. Additionally, zinc oxide nanoparticles and zinc oxide supported on hydroxyapatite (15% wt) were synthesized using the sol-gel method, with cassava starch serving as a stabilizer. X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy equipped with energy-dispersive X-ray microscopy were employed to characterize the morphology and chemical composition of the synthesized hydroxyapatite, zinc oxide nanoparticles, and zinc oxide supported on hydroxyapatite samples. The hydroxyapatite crystal had a hexagonal morphology, incorporating hydroxyl and phosphate functional groups, with a calcium-to-phosphorus molar ratio of 1.64. The photocatalytic process using UV-C light (4 Watt) was conducted to investigate the methylene blue degradation efficiencies of hydroxyapatite, zinc oxide nanoparticles, and zinc oxide supported on hydroxyapatite. The results showed that after 180 minutes of photocatalysis, hydroxyapatite demonstrated greater degradation efficiency of methylene blue compared to zinc oxide nanoparticles and zinc oxide supported on hydroxyapatite. At concentrations of 5 and 20 ppm, the degradation of methylene blue by hydroxyapatite was  $43.74 \pm 0.13\%$  and  $44.13 \pm 0.59\%$ , respectively.

**Keywords:** hydroxyapatite, zinc oxide nanoparticles, methylene blue degradation, photocatalysis

## บทนำ

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) มีสูตรเคมีคือ  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  ประกอบไปด้วยแคลเซียม ฟอสเฟต และหมู่ไฮดรอกซิล [1] โดยทั่วไป HAp จากธรรมชาติสามารถพบและสังเคราะห์ได้จากแหล่งธรรมชาติต่าง ๆ ได้แก่ กระดุกปลา [2, 3] กระดุกไก่ [4] และกระดูกวัว [5] โดย HAp มีความปลอดภัยต่อชีวิตมนุษย์ สามารถดูดซับไอออนหรือโมเลกุลได้ตามธรรมชาติ มีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปในระดับหนึ่ง จึงเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มดีสำหรับการปกป้องสิ่งแวดล้อม สามารถนำ HAp ไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา [1, 5] รวมถึงการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [4] และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายสารอินทรีย์ [6] ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงของ HAp อธิบายได้จากการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\text{OH}\cdot$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ ( $\text{O}_2\cdot^-$ ) ที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงภายใต้การฉายรังสียูวี (UV) ซึ่งนำไปสู่การสลายตัวของสีย้อมต่าง ๆ เช่น สีย้อมกลุ่มเอโซ (Azo) [7] และเมทิลีนบลู [3] ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์เฮเทอโรไซคลิกที่มีหมู่ซัลโฟนิคในโครงสร้างโมเลกุล เป็นสีย้อมที่นิยมใช้กันมากที่สุดในสาขาเคมี ยา และอุตสาหกรรม โดยสีย้อมได้รับการออกแบบให้ยึดเกาะ คงทน และทนต่อกระบวนการทางเคมี การปนเปื้อนเมทิลีนบลูในน้ำเสียจะก่อให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำ จึงควรมีการบำบัดสีในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [3, 8] โดยวิธีการดั้งเดิมในการสลายเมทิลีนบลู เช่น กระบวนการทางชีวภาพ ทางกายภาพ และทางเคมี มีประสิทธิภาพไม่สูงมากในการสลายสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์ [9] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงได้กลายเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการสลายสารปนเปื้อนอินทรีย์รวมถึงสีย้อมที่ทำปฏิกิริยาอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้ปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ค่า pH สันฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และสถานะอื่น ๆ ในกระบวนการเตรียมอาจส่งผลต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงของ HAp [7] อย่างไรก็ตาม HAp มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ค่อนข้างกว้าง (5–6 eV) จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสง เช่น ซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp) [2, 10] โดย 100 mg ZnO/HAp composite แสดงร้อยละการสลายเมทิลีนบลูที่เข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 50 mL ได้สูงเกือบร้อยละ 90 เมื่อฉายแสงยูวีความยาวคลื่น 365 nm ในเวลา 5 นาที [10]

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงที่สามารถสลายสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น ความเฉื่อยทางเคมี ความไวต่อแสงสูง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง มีความเสถียร ช่องว่างแถบพลังงาน (3.37 eV) และไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ ZnO-NPs ยังเป็นสารดูดซับที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับโลหะได้ดี [11, 12]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการสังเคราะห์ HAp จากชีวมวลกระดูกปลากระพงขาว (*Lates calcarifer*) ที่เป็นเศษอาหารจากร้านอาหารในจังหวัดปัตตานี และตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-HAp ด้วยวิธีเคมีสีเขียว (green chemistry) โดยใช้แป้งมันสำปะหลังในการสังเคราะห์ ZnO-NPs แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงสำหรับการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย HAp, ZnO-HAp และ ZnO-NPs ที่สังเคราะห์ได้ เพื่อใช้ประโยชน์จากชีวมวลกระดูกปลาและการสังเคราะห์สารแบบเคมีสีเขียว

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp) จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว และตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) สำหรับการสลายสีของเมทิลีนบลู

## วิธีดำเนินการวิจัย

### สารเคมีและวัสดุ

ชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว จากร้านไทปัน ซีฟู้ด จังหวัดปัตตานี โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, A.R. grade, Qrec) ซิงค์อะซีเตตไดไฮเดรต ( $\text{CH}_3\text{COO}$ )<sub>2</sub>Zn•2H<sub>2</sub>O, A.R. grade, KemAus) เมทิลีนบลู (methylene blue, LAB grade, KemAus) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (25% NH<sub>4</sub>OH, A.R. grade, Loba Chemie™) และแป้งมันสำปะหลังเกรดการค้า

### การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

ขั้นตอนการสังเคราะห์ซึ่งดัดแปลงวิธีการจาก [3] แสดงดังภาพที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว นำไปทำต้มในน้ำเดือดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก เช่น เนื้อ ไขมัน และสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ จากนั้นแช่ในสารละลาย 2% NaOH 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ ล้างให้สะอาดและนำไปอบและเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บดตัวอย่างให้ละเอียด และเก็บตัวอย่างไว้ในโถสุญญากาศ



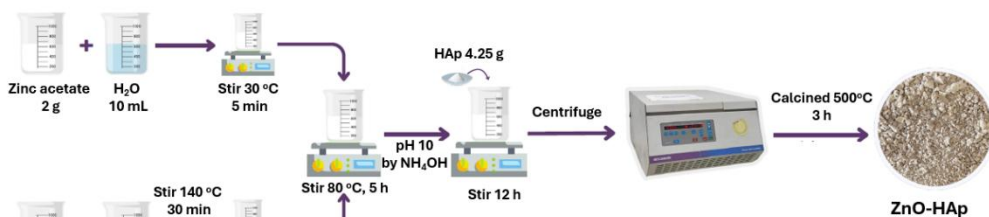
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

### การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) ด้วยวิธีโซล-เจล ซึ่งดัดแปลงวิธีการจาก Khorsand Zak และคณะ [11] โดยละลายซิงค์อะซิเตต ( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 13.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 10 นาที ในขณะเดียวกันละลายแป้งมันสำปะหลังหนัก 10 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 150 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 50 นาที เพื่อให้ได้สารละลายใสของแป้ง จากนั้นเติมสารละลายซิงค์อะซิเตตที่เตรียมได้ลงในสารละลายแป้งใสอย่างช้า ๆ เมื่อส่วนผสมเริ่มเป็นเจลแล้วให้กวนอย่างต่อเนื่องในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเจลไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างไว้ในโถสุญญากาศ

### การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp)

สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp) ที่อัตราส่วน 15:85 โดยน้ำหนัก ซึ่งดัดแปลงวิธีการจาก Van-Pham และคณะ [2] ดังภาพที่ 2 ด้วยการละลายซิงค์อะซิเตต ( $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ในน้ำปราศจากไอออน ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายซิงค์อะซิเตตที่เตรียมได้ลงในสารละลายแป้งใสอย่างช้า ๆ เมื่อส่วนผสมเริ่มเป็นเจลแล้วให้ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง วัดค่า pH และอุณหภูมิเมื่อครบเวลาที่กำหนด จากนั้นเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 จนกระทั่ง pH ของสารละลายเท่ากับ 10 ภายใต้การปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนผสมไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน และนำตัวอย่างแห้งไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเก็บตัวอย่างไว้ในโถสุญญากาศ



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp)

### การศึกษาสมบัติเฉพาะของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, Empyrean, PANalytical ประเทศเนเธอร์แลนด์) ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์  $\text{Cu K}\alpha$  (ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร) แรงดันไฟฟ้าและกระแสเท่ากับ 45 kV และ 30 mA ตามลำดับ ใช้ช่วงการสแกน

ระหว่างมุม ( $2\theta$ ) คือ 5 ถึง 90 องศา step size ( $2\theta$ ) เท่ากับ 0.026 องศา และอัตราการสแกนอยู่ที่ 70.125 วินาที เปรียบเทียบเฟสของวัสดุกับข้อมูลของสารมาตรฐาน และระบุเฟสของผลึกที่ปรากฏในตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า Diffractograms และคำนวณขนาดของผลึกด้วยสมการ Debye-Scherrer โดยเฉลี่ยจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD ดังสมการที่ (1)

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

โดย  $D$  คือ ขนาดผลึก (nm)

$k$  คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ (Scherrer constant)

$\beta$  คือ ความกว้างของพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (full width at half maximum; FWHM)

$\theta$  คือ มุมของแบร็ก (Bragg's angle)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (0.154 nm)

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ได้ โดยใช้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR, Bruker รุ่น Tensor 27 ประเทศเยอรมัน) ในช่วงความยาวคลื่น  $400\text{--}4,000\text{ cm}^{-1}$  และศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM, HITACHI รุ่น SU3900 ประเทศญี่ปุ่น) ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDX) เพื่อศึกษาขนาดอนุภาค สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุ โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 20 kV

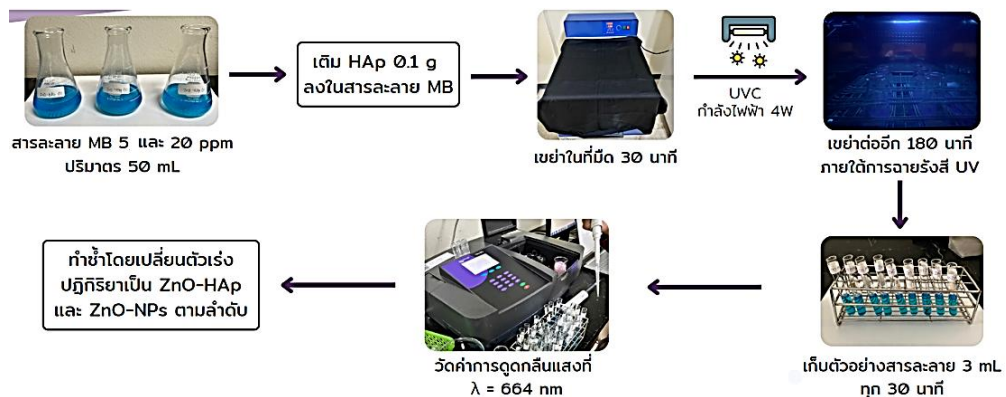
#### การประเมินประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์เมทิลีนบลู (methylene blue) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (photocatalytic process) ดังภาพที่ 3 แล้วคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู และร้อยละประสิทธิภาพการสลาย MB ดังสมการที่ (2) โดยทำการทดลองสถานะ 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA) สำหรับความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ย ( $p < 0.05$ )

$$\text{ประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลู (\%)} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย  $C_0$  เป็นความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น

$C$  เป็นความเข้มข้นของเมทิลีนบลูหลังกระบวนการโฟโตคะตะไลติก



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp)

## ผลการวิจัย

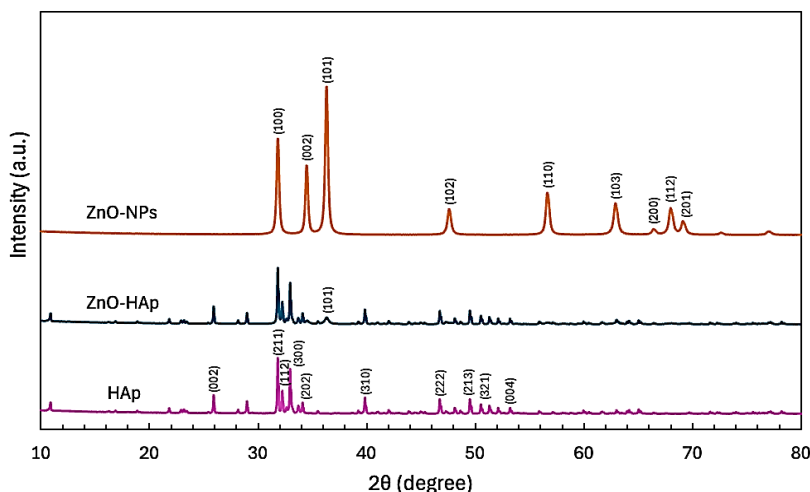
### ลักษณะทางกายภาพของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp

HAp ที่สังเคราะห์จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว โดยแช่ในด่าง (2% NaOH) ซึ่งใช้กระดุกปลา 1:5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วทำให้แห้งโดยการอบและเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C แสดงดังภาพที่ 1 HAp ยังคงลักษณะรูปร่างของกระดูกปลา ลักษณะของสีมีการเปลี่ยนไปเป็นสีขาว เพราะและแตกหักง่าย เมื่อนำไปบดละเอียดน้ำหนัที่ได้ของ HAp หลังจากการเผาคิดเป็นร้อยละผลผลิต เท่ากับ  $60.85 \pm 1.56$  การสังเคราะห์อนุภาค ZnO-NPs จากซิงค์อะซิเตตโดยกระบวนการโซล-เจล และใช้แป้งเป็นตัวคงสภาพ (stabilizer) ได้ ZnO-NPs หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว ขณะที่การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-HAp พบว่า ZnO-HAp หลังจากการเผา 500 °C มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวอ่อนเช่นเดียวกัน

### โครงสร้างผลึกของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ HAp, ZnO-HAp และ ZnO-NPs แสดงดังภาพที่ 4 พบว่า HAp ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ได้แก่ 25.9°, 31.8°, 32.2°, 32.9°, 34.1°, 39.8°, 46.7°, 49.5°, 50.5° และ 53.2° ตรงกับระนาบผลึก (002), (211), (112), (300), (202), (310), (222), (213), (321) และ (004) ตามลำดับ สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS-090432 บ่งชี้ว่าตัวอย่าง HAp ที่เตรียมได้มีรูปทรงแบบเฮกซะโกนัล [5, 13] เช่นเดียวกับ ZnO-HAp ซึ่งปรากฏพีคตำแหน่งเดียวกับ HAp แต่จะปรากฏพีคเพิ่มเติมที่ตำแหน่ง 36.3° สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (101) ซึ่งเป็นพีคของ ZnO และตัวอย่าง ZnO-NPs ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 31.8°, 34.5°, 36.3°, 47.6°, 56.6°, 62.9°, 66.4°, 68.0° และ 69.1° สอดคล้องกับระนาบผลึก (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112)

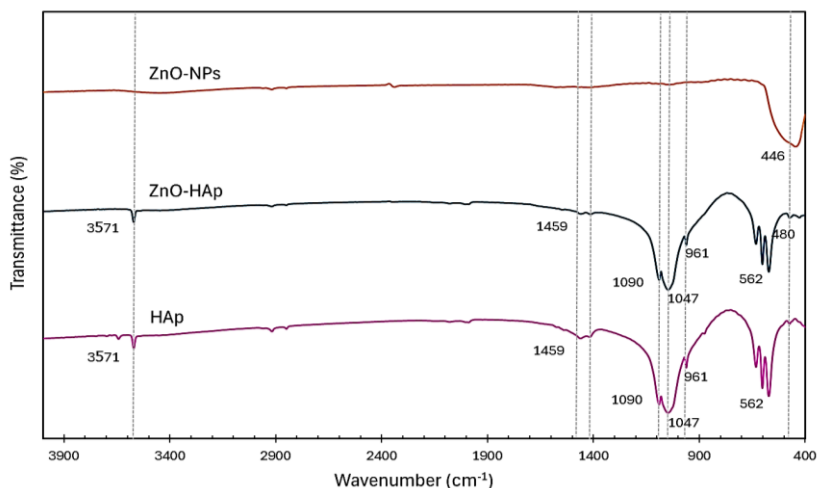
และ (201) ตามลำดับ บ่งชี้ว่าตัวอย่างที่เตรียมได้มีรูปทรงแบบเฮกซะโกนัล ตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS-01-007-2551 [14] และจากการคำนวณขนาดผลึก (Crystallite size) ของ HAp, ZnO-HAp และ ZnO-NPs ตามสมการของเชอร์เรอร์ ได้ขนาดผลึกคือ 56.18, 37.90 และ 56.18 nm ตามลำดับ



ภาพที่ 4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO-NPs) และซิงก์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp)

#### การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp ด้วยเครื่องฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

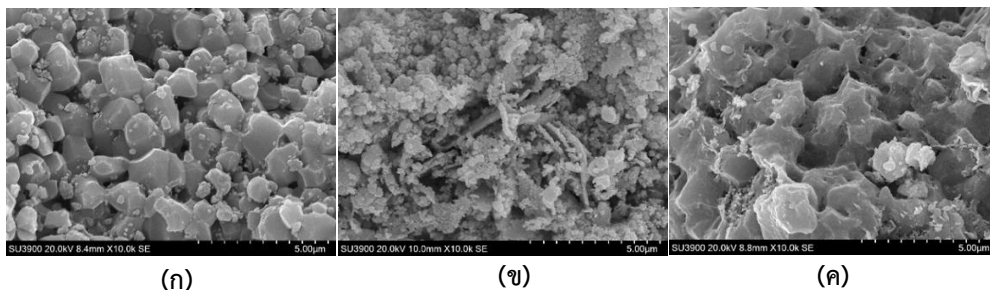
การวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR ของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่ผิวดังภาพที่ 5 พบพิกที่เป็นลักษณะเฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ได้แก่ เลขคลื่น 1,047, 1,091, 962 และ 562  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งที่พิก 1,022 และ 1,091  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบไม่สมมาตรของกลุ่มฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) พิกที่เลขคลื่น 1,459  $\text{cm}^{-1}$  สัมพันธ์กับการสั่นของกลุ่มคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และที่เลขคลื่น 3571  $\text{cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) [5, 15] ส่วนสเปกตรัม FT-IR ของ ZnO-HAp พบพิกที่เป็นลักษณะเฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์ตรงตำแหน่งเช่นเดียวกับสเปกตรัมของ HAp และพบพิกที่เป็นลักษณะเฉพาะของ ZnO ที่เลขคลื่น 446  $\text{cm}^{-1}$  ของ ZnO-NPs และที่ 480  $\text{cm}^{-1}$  ของ ZnO-HAp ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างซิงค์ (Zn) กับออกซิเจน (O) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวนี้ ยืนยันการมีอยู่ของ ZnO-NPs [16]



ภาพที่ 5 สเปกตรัม FT-IR ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) และ ซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ZnO-HAp)

#### การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDX)

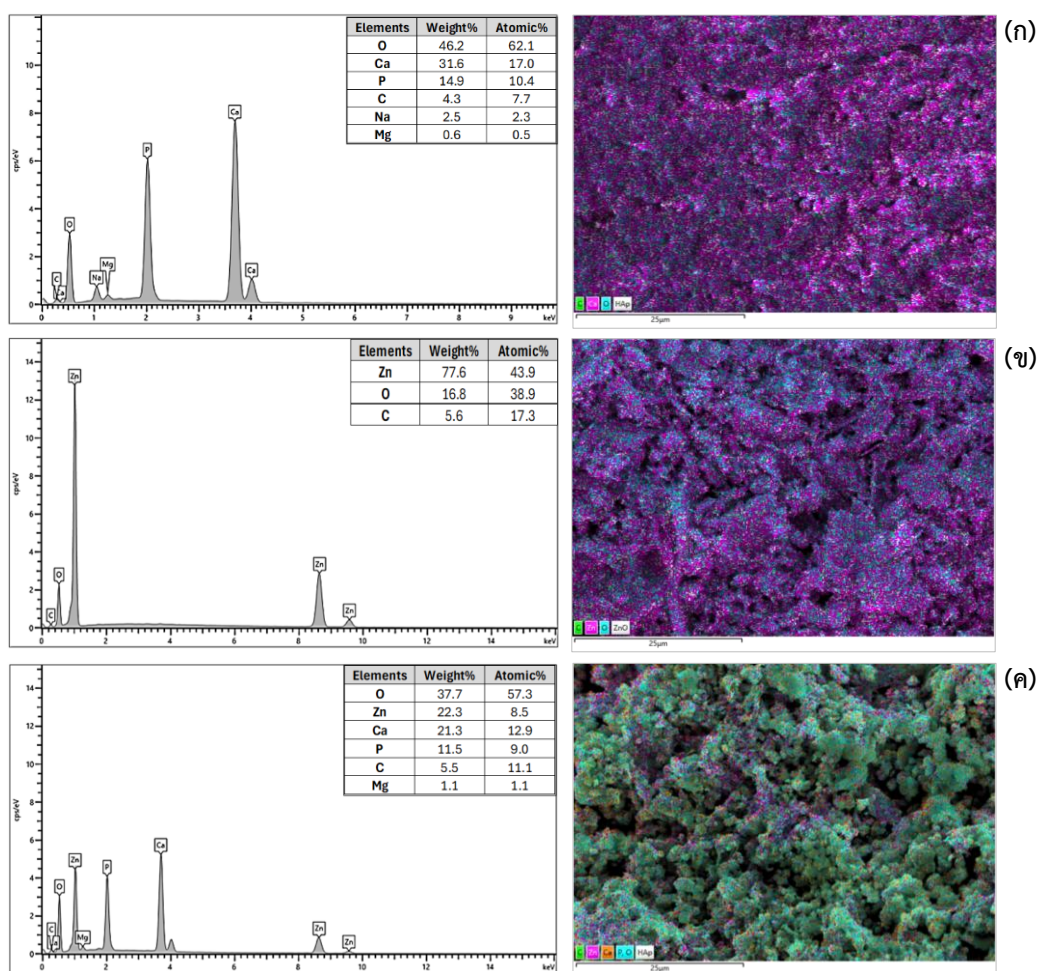
สัณฐานวิทยาของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp จากกล้อง SEM ดังภาพที่ 6 แสดงให้เห็นการก่อตัวของอนุภาค HAp ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นระเบียบและมีขนาดไม่สม่ำเสมอ พบมากที่ขนาดอนุภาค 10 ไมครอน และเห็นได้ชัดว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะแบบเฮกซะโกนัล ในภาพที่ 6ข แสดงภาพของ ZnO-NPs พบว่า อนุภาคกระจายตัวกันเป็นกลุ่มรวมกันแน่นหนา มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.6-2 ไมครอนเมตร ในขณะที่ ZnO-HAp แสดงดังภาพที่ 6ค สังเกตได้ว่าอนุภาคมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ HAp มีลักษณะรวมกันเป็นก้อนมากขึ้น มีขนาดอนุภาคประมาณ 14 ไมครอน และมีอนุภาคของ ZnO ค่อนข้างน้อยบนผิว HAp



ภาพที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) HAp, (ข) ZnO-NPs และ (ค) ZnO-HAp ที่กำลังขยาย x10,000

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดูด้วยแสง ซิงค์ออกไซด์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และซิงค์ออกไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EDX ของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp แสดงดังภาพที่ 7 โดยภาพที่ 7ก แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ HAp พบว่า ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน (O), ฟอสฟอรัส (P) และแคลเซียม (Ca) โดยมีอัตราส่วนโดยโมล Ca/P คือ 1.64 ใกล้เคียงกับ 1.67 ของ HAp และยังพบธาตุโซเดียม (Na) และแมกนีเซียม (Mg) ปริมาณเล็กน้อย ภาพที่ 7ข แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ ZnO-HAp พบว่า ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), ฟอสฟอรัส (P), แคลเซียม (Ca) และซิงค์ (Zn) อีกทั้งยังพบแมกนีเซียม (Mg) ปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้อัตราส่วน Ca/P ของตัวอย่างคือ 1.43 ซึ่งต่ำกว่า 1.67 ของ HAp ที่เป็นสัดส่วนตามทฤษฎี และการวิเคราะห์ EDX ของตัวอย่าง ZnO-NPs ที่เตรียมได้ แสดงในรูปที่ 7ค พบว่า ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน (O) และซิงค์ (Zn) นอกจากนี้ ยังพบธาตุคาร์บอน (C) และจากภาพ SEM mapping (ภาพที่ 7ค) พบการกระจายตัวของ ZnO ที่ไม่สม่ำเสมอบน HAp

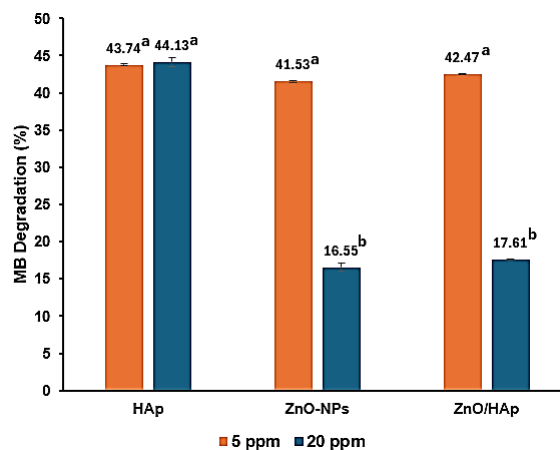


ภาพที่ 7 สเปกตร้า EDX และภาพถ่าย mapping ของ (ก) HAp, (ข) ZnO-NPs และ (ค) ZnO-HAp

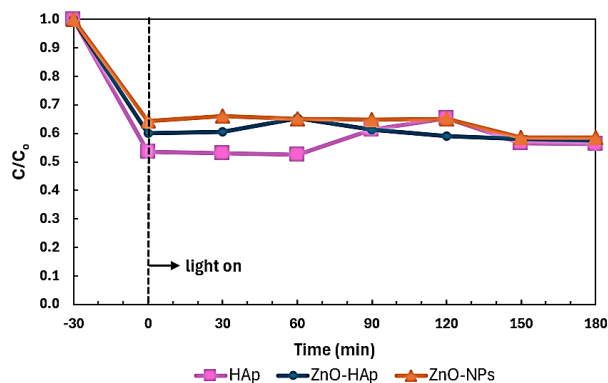
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยแสง ซึ่งก่อกอไซด์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และซิงค์ก่อกอไซด์บนไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว

### การประเมินประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสลายเมทิลีนบลู

การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสลายเมทิลีนบลูที่ 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 20 ppm เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp 0.1 กรัม แสดงดังภาพที่ 8 พบว่าที่ความเข้มข้น 5 ppm ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพอยู่ที่  $43.74 \pm 0.13^a$ ,  $41.53 \pm 0.12^a$  และ  $42.47 \pm 0.10^a$  ตามลำดับ หลังการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ 180 นาที และที่ความเข้มข้น 20 ppm พบว่า HAp แสดงประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูดีที่สุดที่  $44.13 \pm 0.59\%$  ขณะที่ ZnO-NPs และ ZnO-HAp มีค่าการสลายเมทิลีนบลู  $17.61 \pm 0.10^b$  และ  $16.55 \pm 0.52\%^b$  ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบการดูดซับบนตัวเร่งขณะกวนสารละลายในที่มีเมทิลีนบลู HAp ZnO-NPs และ ZnO-HAp พบว่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 9 แต่เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการฉายแสง UV-C (4 วัตต์) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 180 นาที พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการสลายด้วยแสง UV-C ของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 5 และ 20 ppm ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp



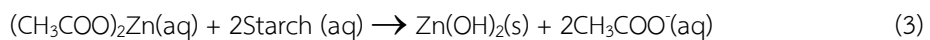
ภาพที่ 9 การลดลงของความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ 5 ppm เมื่อเก็บในที่มืดและเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วย HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp โดยการฉายแสง UV-C เป็นเวลา 180 นาที

## อภิปรายผลการวิจัย

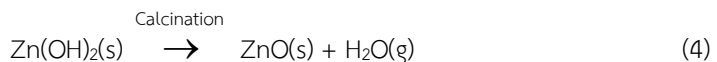
### การสังเคราะห์ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp

การต้มชีวมวลกระดูกปลากะพงสดทำให้แยกเนื้อปลาลอกจากกระดูกได้ง่าย และการแช่กระดูกปลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 เป็นการทำให้กระดูกปลาทำปฏิกิริยาสพอนิฟิเคชันกับโซเดียมและคอลลาเจนที่ติดกับกระดูกปลา ทำให้เหลือเพียงกระดูกปลาที่มีสีค่อนข้างขาวดังภาพที่ 1 และเมื่อนำกระดูกปลากะพงที่ผ่านการกำจัดไขมันไปเผา ทำให้สารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ถูกเผาไหม้ออกไปเหลือเพียง HAp ที่มีสีค่อนข้างขาวหรือเหลืองอ่อนและสารอนินทรีย์บางตัวที่ตกค้าง เช่น Na และ Mg ซึ่ง HAp ที่เตรียมจากกระดูกปลากะพงขาวอาจมี Na มาจากขั้นตอนการเตรียม HAp ที่มีการแช่ต่างเพื่อกำจัดคอลลาเจนและมี Mg ปริมาณน้อยในกระดูกปลาทั่วไป [17] ทั้งนี้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR (ภาพที่ 5) ยืนยันว่ามีหมู่ฟอสเฟตและหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของ HAp ที่สังเคราะห์ได้ และผลจาก XRD (ภาพที่ 4) ยืนยันว่าเป็น HAp ที่มีรูปทรงผลึกเป็นเฮกซะโกนัล สังเกตได้ในภาพถ่าย SEM (ภาพที่ 7ก) และอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P มีค่าเท่ากับ 1.64 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี

สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ ZnO-NPs เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (3) ดังนี้



โดยโมเลกุลของแป้งซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะเกิดไฮโดรลิซิสในน้ำเมื่อให้ความร้อน ทำหน้าที่เป็นสารให้ความเสถียรโดยหมู่ -OH ของแป้งเกิดอันตรกิริยากับ  $\text{Zn}^{2+}$  ของ  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  และโมเลกุลอะไมโลสจะเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหจับน้ำไว้ภายในเกิดเป็นเจล [11] เมื่อนำไปเผา ดังปฏิกิริยา (4) อนุภาคของซิงค์ออกไซด์จึงไม่รวมตัวกันจนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ดังภาพจาก SEM (ภาพที่ 6 และ 7)

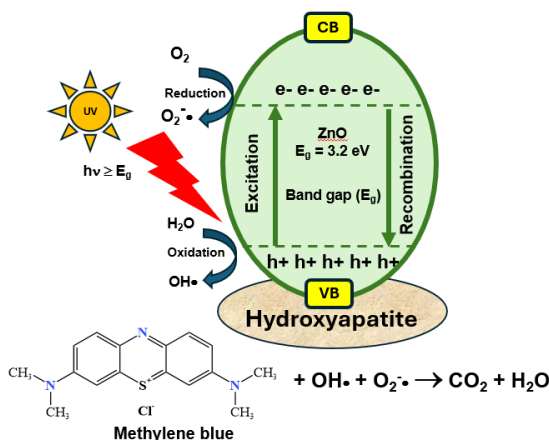


เมื่อนำตัวอย่าง ZnO-HAp ไปตรวจสอบด้วย FT-IR ปรากฏการสั่นที่เลขคลื่นที่เป็นของหมู่ฟอสเฟตและหมู่ไฮดรอกซิลของ HAp อย่างชัดเจนและยังพบการสั่นที่บ่งชี้ถึงหมู่ฟังก์ชัน -Zn-O แม้จะไม่เด่นชัดเนื่องจากอัตราส่วนของ ZnO:HAp มีค่าต่ำ (15:85) แสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์ตัวเร่ง ZnO-HAp ได้ด้วยวิธีโซล-เจล และผลจาก XRD พบว่าปรากฏพีคตำแหน่งเดียวกับ HAp แต่ปรากฏพีคเพิ่มเติมที่ตำแหน่งมุม  $36.3^\circ$  ที่สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (101) ซึ่งเป็นพีคของ ZnO โดย ZnO เกาะติดบนผิวของ HAp ไม่ได้เข้าไปแทนที่แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ภายในโครงสร้าง [14] และสังเกตได้ดังภาพถ่าย SEM (ภาพที่ 6ค และ 7ค) จากสมบัติทางเคมีและกายภาพแสดงให้เห็นว่า ZnO-NPs และ ZnO-HAp มีศักยภาพในการนำไปศึกษาการกำจัดเมทิลินบลู

### ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลินบลูด้วย HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp

ตัวเร่งทั้งสามชนิดเร่งปฏิกิริยาการสลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นของเมทิลินบลู 5 ppm ได้ โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มเป็น 20 ppm ร้อยละการสลายเมทิลินบลูมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นตัวเร่ง HAp (ดังภาพที่ 8) อาจเกิดจาก HAp มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและประจุลบที่ผิว แล้วยังมีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่า ZnO-NPs และ

ZnO-HAp ดังภาพจากกล้อง SEM (ภาพที่ 6) ขั้นตอนการดูดซับจึงเกิดได้มากกว่า สำหรับกลไกของกระบวนการเร่งสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง UV-C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-HAp คาดว่ามีกลไกการเกิดปฏิกิริยา [10, 18] ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กลไกที่คาดว่าเกิดขึ้นในการสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้รับพลังงานจากแสง UV-C มากกระตุ้นโดยพลังงานแสงนั้นจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (band gap energy,  $E_g$ ) อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ (VB) จะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าหรือแถบคอนดักชัน (CB) ทำให้เกิดช่องว่างหรือโฮล ( $h^+$ ) ที่แถบเวเลนซ์ โฮลในแถบเวเลนซ์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับประจุไฮดรอกซิลกลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\text{OH}\cdot$ ) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระหรือตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงในกระบวนการเร่งสลายด้วยแสง ในขณะเดียวกัน อิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจากสารละลายซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง กลายเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radicals,  $\text{O}_2\cdot^-$ ) แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ทำหน้าที่สลายโครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟต ไนเตรต และคลอไรด์ไอออน [10, 15, 18]

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นพบว่าประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูด้วยแสงของ HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp ที่ได้จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาวในงานวิจัยนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่างานวิจัยของ Manikandan และคณะ [10] ซึ่งสลาย 10 ppm MB ด้วย ZnO/HAp composites ได้ถึงร้อยละ 96.5 และงานวิจัยของ Matei และคณะ [15] ซึ่งสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูง 1,000 ppm ด้วย HAp ที่เคลือบบนแผ่นแก้ว ได้ร้อยละ 33 แต่สูงกว่างานวิจัยของ Mondal และคณะ [18] ซึ่งดูดซับ 5 ppm MB ด้วย HAp ได้ร้อยละ 11 และสลาย MB ได้ร้อยละ 13 สันนิษฐานได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้อาจได้รับพลังงานแสงไม่เพียงพอ เพราะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสง UV-C ขนาด 4 วัตต์ ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จากหลอด LED ที่มีค่าพลังงานคือ 4.88 eV อาจกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าของ HAp และ ZnO ได้น้อย

ไม่เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล และอนุมูลอิสระที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive oxygen species, ROS) ที่มากพอในการสลายเมทิลีนบลูได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลูมีค่าต่างกัน ได้แก่ สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิวและความเป็นผลึก ตัวเร่งปฏิกิริยา HAp ที่สังเคราะห์ด้วยการแช่ในต่างและทำให้แห้งด้วยการเผานั้น เมื่อพิจารณาผล XRD พบว่าอนุภาค HAp ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะความเป็นผลึกมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-HAp ซึ่งมี ZnO กระจายบนผิวหน้า HAp แม้จะมีขนาดผลึกไม่แตกต่างกัน ความเป็นผลึกมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน สารที่มีความเป็นผลึกสูงอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพการกำจัดเมทิลีนบลูของ HAp อาจเกิดจากการดูดซับมากกว่าการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ (ดังผลในภาพที่ 9) ซึ่งยังคงมีค่าสูงกว่าแม้ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเพิ่มเป็น 20 ppm เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-HAp และ ZnO-NP ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซล-เจล โดยการดูดซับเกิดได้ดีผ่านประจุบวกของเมทิลีนบลูกับประจุลบที่ผิวหน้าของ HAp รวมถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมไนโตรเจนของเมทิลีนบลูและหมู่ไฮดรอกซิลของ HAp [19] ทั้งนี้ การนำตัวเร่งกลับมาใช้ใหม่และการตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเร่งปฏิกิริยา เช่น ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand, COD) ของสารละลายเมทิลีนบลู ก่อนและหลังการเร่ง รวมถึงสถานะอื่น เช่น สัดส่วนของ ZnO:HAp โดยการเพิ่มปริมาณ ZnO การเพิ่มโลหะทรานซิชันอื่น ๆ ปริมาณของตัวเร่ง พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ของตัวเร่งประจุที่ผิวตัวเร่ง กลไกการดูดซับประจุ การเพิ่มความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ความสว่าง ชนิดของแหล่งแสง และการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของแหล่งแสงยังต้องศึกษาต่อไป รวมถึงการลดต้นทุนการผลิต HAp เนื่องจากเมื่อคำนวณต้นทุนการผลิต HAp ในงานวิจัยนี้จะได้ต้นทุนที่สูง คือประมาณ 8 บาทต่อกรัม สูงกว่าราคาของวัสดุดูดซับทางการค้าที่เป็นถ่านกัมมันต์ (0.1 บาทต่อกรัม)

โดยสถานะที่ดีที่สุดของการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วย HAp, ZnO-NPs และ ZnO-HAp เกิดที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูต่ำ ๆ (5 ppm) และประสิทธิภาพการเร่งของ ZnO-HAp และ ZnO-NPs ลดต่ำลงเมื่อความเข้มข้นของเมทิลีนบลูสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

### สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียม HAp จากชีวมวลกระดูกปลากะพงขาว ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยต่างและการเผา นอกจากนี้ยังสังเคราะห์ ZnO-NPs และ ZnO-HAp โดยกระบวนการโซล-เจล และใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวให้ความเสถียร โดย HAp มีลักษณะผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P คือ 1.64 และ ZnO-NPs มีลักษณะผลึกแบบเฮกซะโกนัล ส่วนผลึกของ ZnO-HAp แสดงความเป็นผลึกเฮกซะโกนัลของ HAp เมื่อนำตัวเร่งดังกล่าวไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสำหรับการสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 5 และ 20 ppm พบว่า HAp แสดงประสิทธิภาพการสลายเมทิลีนบลูอยู่ที่  $43.74 \pm 0.13\%$  และ  $44.13 \pm 0.59\%$  ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตัวเร่ง ZnO-NPs และ ZnO-HAp หลังจากการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการเป็นเวลา 180 นาที

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิเคราะห์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ibrahim, M., Labaki, M., Giraudon, J., & Lamonier, J. (2020). Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 383 (August 2019), 121139.
- [2] Van-Pham, D.-T., Phat, V. V., Chiem, N. H., Thi, T., Quyen, B., & Ngoc, N. T. (2022). Synthesis of hydroxyapatite / zinc oxide nanoparticles from fish scales for the removal of hydrogen sulfide. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(3), 323–329.
- [3] Credo, A. S., Pascual, M. G., Villagrancia, M. J. C., Villaruz, A. D., Roque, E. C., Lopez, E. C. R., & Rubi, R. V. C. (2023). Photocatalytic degradation of malathion using hydroxyapatite derived from *Chanos chanos* and *Pangasius dory* Bones. *Engineering Proceedings*, 37, 7.
- [4] Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Hosseini, S. S., Akbari, A., & Ramavandi, B. (2021). Hydroxyapatite biomaterial production from chicken (femur and beak) and fishbone waste through a chemical less method for  $\text{Cd}^{2+}$  removal from shipbuilding wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 413, 125428.
- [5] Adam, D., Ongsuwan, N., & Chotisuwan, S. (2023). Photoreforming of glycerol catalyzed by  $\text{CuO}/\text{TiO}_2$  supported on hydroxyapatite. *Sains Malaysiana*, 52(9), 2713-2723.
- [6] Liandi, A. R., Rianom, W. H., Cahyana, A. H., Fathoni, A., & Wendari, T. P. (2024). Transforming seafood waste: Green mussel shell-derived hydroxyapatite as a catalyst for spirooxindole synthesis. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101796.
- [7] Reddy, M. P., Venugopal, A., & Subrahmanyam, M. (2007). Hydroxyapatite photocatalytic degradation of calmagite (an azo dye) in aqueous suspension. *Applied Catalysis B: Environmental*, 69(3–4), 164–170.
- [8] Malekkiani, M., Heshmati, A., Magham, J., Ravari, F., & Dadmehr, M. (2022). Facile fabrication of ternary MWCNTs/ZnO/Chitosan nanocomposite for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue and antibacterial activity. *Scientific Reports*, 12, 5927.
- [9] Houas, A., Lachheb, H., Ksibi, M., Elaloui, E., Guillard, C., & Herrmann, J. (2001). Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 31(2), 145–157.

- [10] Manikandan, K., Kumar, N. D., Velmurugan, R., Gokulnath, M., & Parvathy, S. (2025). Enhanced efficiency of zinc oxide hydroxyapatite nanocomposite in photodegradation of methylene blue, ciprofloxacin, and in wastewater treatment. *Scientific Reports*, 15, 31819.
- [11] Khorsand Zak, A., Abd. Majid, W. H., Mahmoudian, M. R., Darroudi, M., & Yousefi, R. (2013). Starch-stabilized synthesis of ZnO nanopowders at low temperature and optical properties study. *Advanced Powder Technology*, 24(3), 618–624.
- [12] Buazar, F., Bavi, M., Kroushawi, F., Halvani, M., Hossieni, S. A., Bavi, M., Kroushawi, F., & Halvani, M. (2016). Potato extract as reducing agent and stabiliser in a facile green one-step synthesis of ZnO nanoparticles. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(3), 175–184.
- [13] Venkatesan, J. & Kim, S.-K. (2016). Hydroxyapatite from marine fish bone: isolation and characterization techniques (pp 17-28). In Kim, S.-K. (Ed.). *Marine Biomaterials: Characterization, Isolation and Applications* (1<sup>st</sup> ed.). CRC Press.
- [14] Muhammad, W., Ullah, N., Haroon, M., & Abbasi, B. H. (2019). Optical, morphological and biological analysis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) using: *Papaver somniferum* L. *RSC Advances*, 9(51), 29541–29548.
- [15] Matei, R.I., Baroi, A. M., Fistos, T., Fierascu, I., Grapin, M., Raditoiu, V., Raduly, F. M., Nicolae, C. A., & Fierascu, R. C. (2024). Clam shell-derived hydroxyapatite: a green approach for the photocatalytic degradation of a model pollutant from the textile industry. *Materials*, 17(11), 2492.
- [16] Barzinjy, A.A. & Azeez, H.H. (2020). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus globulus* Labill. leaf extract and zinc nitrate hexahydrate salt. *SN Applied Sciences*, 2(5), 991.
- [17] Shi, P., Liu, M., Fan, F., Yu, C., Lu, W., & Du, M. (2018). Characterization of natural hydroxyapatite originated from fish bone and its biocompatibility with osteoblasts. *Materials Science and Engineering C*, 90, 706–712.
- [18] Mondal, S., De Anda Reyes, M. E., & Pal, U. (2017). Plasmon induced enhanced photocatalytic activity of gold loaded hydroxyapatite nanoparticles for methylene blue degradation under visible light. *RSC Advances*, 7(14), 8633–8645.
- [19] Aaddouz, M., Azzaoui, K., Akartasse, N., Mejdoubi, E., Hammouti, B., Taleb, M., Sabbahi, R., & Alshahateet, S.F. (2023). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto hydroxyapatite nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1288, 135807.

การพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจาก *Bacillus subtilis* โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทาง  
การเกษตร และการประเมินประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด  
Development of Pelletized Bioformulation from *Bacillus subtilis* Using  
Agricultural Waste Materials and Evaluation of Its Effects on Lettuce Growth

ฮุสนา ทีมง<sup>1\*</sup>, อัญรินทร์ ภูมีสุข<sup>2</sup>, ซูไฮมิน เชห์มะลี<sup>3</sup>, และ นริศรา ดารากัย<sup>4</sup>  
Husna Teemung<sup>1\*</sup>, Anyarin Phumeesuk<sup>2</sup>, Suhaimin Chehmalee<sup>3</sup> and Narissara Darakai<sup>4</sup>

<sup>1</sup>สำนักวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

<sup>2</sup>สาขาเคมี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

<sup>3</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

<sup>4</sup>บริษัท กาตินา เนเชอรัล โปรดักส์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000 ประเทศไทย

<sup>1</sup>Research and Innovation Institute, Fatoni University. Pattani Province, 94160, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Education, Fatoni University. Pattani Province, 94160, Thailand

<sup>3</sup>Faculty of Science and Technology, Fatony University. Pattani Province, 94160, Thailand

<sup>4</sup>Katina natural product co., ltd Nakhon Si Thammarat Province, 8000, Thailand

Submitted 17/04/2026 ; Revised 21/05/2026 ; Accepted 28/05/2026

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมาก เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมสารเคมีในสิ่งแวดล้อมและดินเสื่อมคุณภาพ จึงมีการพัฒนาสารชีวภัณฑ์ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจากเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยตรงเชื้อบวมวัสดุตัวกลางจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชี้อย่างพารา และขี้ข้าวโพดบดละเอียด พร้อมศึกษาคุณสมบัติและประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจริงในการปลูกพืชโดยใช้การจัดพริตเมนต์แบบแฟกทอเรียลและวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ผลการศึกษาพบว่าเชื้อแบคทีเรียมีอัตราการรอดชีวิต  $6.3 \times 10^6$  cfu/g และอัตราส่วนการเคลือบสารไฮโดรเจลจากขี้ข้าวโพดที่เหมาะสม คือ 1:1 ไม่พบสารพิษตกค้างในกลุ่มสารเคมีทั้ง 7 กลุ่ม และมีอัตราการรอดชีวิตของเซลล์  $46.44 \pm 2.78\%$  อีกทั้งยังมีสมบัติทางกายภาพและมีปริมาณธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม กำมะถัน และไนโตรเจนที่เหมาะสม เมื่อทดสอบกับผักสลัด 3 ชนิด ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว โรเมน และผักสลัดสีแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวกับปุ๋ยอินทรีย์ผสมสารชีวภัณฑ์ พบว่าสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (MANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่าชนิดพืช สูตรปุ๋ย และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

**คำสำคัญ:** สารไฮโดรเจลจากขี้ข้าวโพด สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด ชี้อย่างพารา

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding author)

E-mail: Husnateemung@gmail.com

## Abstract

Currently, large amounts of chemical fertilizers are used to increase agricultural productivity, resulting in the accumulation of chemical residues in the environment and the deterioration of soil quality. Therefore, environmentally friendly bioformulations have been developed as alternative agricultural inputs. This research aimed to develop a pelletized bioformulation from *Bacillus subtilis* by immobilizing the bacteria on carrier materials derived from agricultural wastes, including rubberwood sawdust and finely ground corncobs. The study also investigated the properties of the bioformulation and evaluated its practical efficiency in plant cultivation using a factorial experiment in a completely randomized design (CRD). The results showed that the bacterial survival rate was  $6.3 \times 10^6$  cfu/g, and the optimal coating ratio of corncob-derived hydrogel was 1:1. No toxic chemical residues from any of the seven chemical groups were detected, and the cell survival rate was  $46.44 \pm 2.78\%$ . In addition, the bioformulation exhibited suitable physical properties and essential nutrient contents. The bioformulation was tested on three types of lettuce, namely green leaf lettuce, romaine lettuce, and red leaf lettuce, by comparing the use of organic fertilizer alone with organic fertilizer supplemented with the bioformulation. The results demonstrated that the bioformulation significantly promoted plant growth. MANOVA and one-way ANOVA analyses revealed that plant type, fertilizer formulation, and the interaction between these two factors significantly affected shoot length and plant weight.

**Keywords:** corncob-based hydrogel, pelletized bioproduct, rubber wood sawdust

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด เช่น ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน และทุเรียน เป็นต้น การผลิตพืชเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยการผลิตที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยซึ่งปัจจุบันมีทั้งปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยชีวภาพ [1] อย่างไรก็ตาม เกษตรกรส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาปุ๋ยเคมีเป็นหลักเนื่องจากให้ผลตอบสนองรวดเร็ว โดยในปี พ.ศ. 2568 ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.7 หรือประมาณ 4.7 ล้านตัน อันเนื่องมาจากการขยายพื้นที่เพาะปลูกและสภาพภูมิอากาศที่เอื้ออำนวยต่อการผลิตพืชเศรษฐกิจ [2] แม้ว่าปุ๋ยเคมีจะช่วยเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้ในปริมาณสูงและต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อคุณภาพดิน สิ่งแวดล้อม และความปลอดภัยของผู้บริโภค ทำให้ปัจจุบันมีความสนใจในการใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพเพิ่มมากขึ้น โดยพื้นที่เกษตรอินทรีย์ของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทั้งพืชเศรษฐกิจหรือการปลูกผักต่าง ๆ และภาครัฐมีเป้าหมายขยายพื้นที่เกษตรอินทรีย์ให้ถึง 2 ล้านไร่ภายในปี พ.ศ. 2570 [3]

แนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการลดการใช้สารเคมีและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต คือ การใช้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อพืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ซึ่งสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคพืชได้ โดยเฉพาะแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่มีความสามารถในการสร้างสารปฏิชีวนะ เอนไซม์ และฮอร์โมนพืช เช่น indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งช่วยกระตุ้นการพัฒนาระบบรากและเพิ่มการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช [4] อย่างไรก็ตาม การนำจุลินทรีย์มาใช้ในภาคสนามจำเป็นต้องมีวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้เชื้อมีความคงทนสามารถปลดปล่อยสู่ดินได้อย่างต่อเนื่อง การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชีเลื่อยยางพารา และซังข้าวโพด เป็นวัสดุตัวกลางนับเป็นแนวทางที่มีศักยภาพเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอินทรีย์วัตถุสูง ช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน กักเก็บความชื้น และเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังช่วยลดมูลค่าให้กับของเหลือใช้ทางการเกษตรและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากนี้โรคพืชที่เกิดจากเชื้อราในดิน เช่น *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp. และ *Phytophthora* spp. เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตพืชเศรษฐกิจลดลงในประเทศไทย การใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีจุลินทรีย์ปฏิปักษ์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการควบคุมโรคพืชอย่างปลอดภัยและยั่งยืน [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาสารชีวภัณฑ์ตรึงเชื้อแบคทีเรียตัวกลางจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับการเคลือบสารไฮโดรเจล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารและช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างเหมาะสมและต่อเนื่อง

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของปุ๋ยสารชีวภัณฑ์
2. เพื่อศึกษาการคงอยู่ของเชื้อและการประเมินประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตภายใต้สภาพการปลูกจริงในการแปลงเกษตรอินทรีย์ ณ ฟาร์มอาร์ออร์แกนิก อำเภอรามัน จังหวัดยะลา

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การเตรียมตัวอย่างการขึ้นรูปปุ๋ยสารชีวภัณฑ์

นำตัวอย่างซีลี้อย่างพาราและซังข้าวโพดบดละเอียดมาฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อใช้ในการผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ที่มีปริมาณความเข้มข้น  $10^8$  cfu/g ซึ่งเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ tryptic soy broth หลังจากบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวไปผสมกับผงซีลี้อย่างพาราและซังข้าวโพดในอัตราส่วน 100 มิลลิกรัม ต่อผงซีลี้อย่างพารา 200 กรัม และต่อซังข้าวโพด 200 กรัม ทำการบ่มเชื้อเป็นเวลา 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการอัดเป็นเม็ดของปุ๋ยสารชีวภัณฑ์อบแห้ง จากนั้นนำไปเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดต่อไป

### การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดซังข้าวโพด

การเตรียมสารสกัดซังข้าวโพดโดยนำซังข้าวโพดมาต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการกรองตัวอย่างสารสกัดที่ได้ แล้วนำสารสกัดซังข้าวโพดผสมกับสาร มอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 25 : 50, 50 : 50 และ 75 : 50 ตามลำดับ และนำตัวอย่างดังกล่าวผ่านความร้อน 800 วัตต์เป็นระยะเวลา 1 นาที ทำให้ตัวอย่างเป็นเจลไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการเคลือบบนวัสดุตัวกลางต่อไป

### การทดสอบลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพและเคมี

นำสารสกัดที่เตรียมจากซังข้าวโพดไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (ColorFlex® EZ colorimeter, HunterLab, USA) โดยการวิเคราะห์ค่าความสว่าง ( $L^*$ ) สีแดง/สีเขียว ( $a^*$ ) และ สีเหลือง/สีน้ำเงิน ( $b^*$ ) และวัดค่าความต่างของสี ( $\Delta E^*$ ) ดังสมการที่ 1

การทดสอบความเป็นกรดต่างในตัวอย่างใช้เครื่องวัดพีเอช (pH meter) โดยการนำตัวอย่าง 1 กรัมต่อน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ทำการผสมเข้าด้วยกัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ทำการวัดความเป็นกรด-ต่างโดยเครื่องวัดพีเอช (pH meter) และทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

$\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  คือ ความต่างระหว่างพารามิเตอร์สีของตัวอย่าง และพารามิเตอร์สีของตัวอย่างที่เป็นชุดควบคุม

### การทดสอบการระคายเคือง

การศึกษาการระคายเคือง (skin irritation) ด้วยวิธี *In vitro* skin irritations: reconstructed human epidermis test method [7]

### การทดสอบสารพิษตกค้าง

ทำการทดสอบสารพิษตกค้าง จำนวน 7 กลุ่ม ได้แก่ organochlorine group, organophosphate group, pyrethroid group, carbamate group, multiresidue, paraquat และ glyphosate โดยวิธีการทดสอบ In-house method based on QuEChERS method by GC-FPD technique ตามลำดับ [8]

### การทดสอบจุดละลายและจุดเดือด

**การทดสอบจุดละลาย** ชั่งตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม ใส่ในกระชอนอลูมิเนียมและปิดฝา (crimp) ให้แน่น จากนั้นทำการโหลตัวอย่างและการอ้างอิงโดยการตั้งโปรแกรมอัตราการช่วงอุณหภูมิเริ่มวัดและบันทึกการไหลของความร้อนต่ออุณหภูมิ และทำการวิเคราะห์โดยระบุอุณหภูมิเริ่มต้นอุณหภูมิสูงสุด และเอนทัลปีของการเผาไหม้ (จุดต่อกรัม)

**จุดเดือด** การนำปฏิกิริยาสารบริสุทธิ์ใส่ลงในเครื่องวัดจุดเดือดหรือภาชนะสำหรับการกลั่น และตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมปนในตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดจุดเดือดตามความดันบรรยากาศและวัดจุดเดือดภายใต้แรงดันลด นำการแปลงค่าจุดเดือดที่แรงดันต่าง ๆ ไปเทียบกับที่ 1 บรรยากาศ โดยใช้สมการคลอเซียส-คลาเปียร์รอง (Clausius-Clapeyron equation) หรืออ้างอิงค่าที่ได้จากสมการเพื่อหาจุดเดือดที่ความดันมาตรฐาน

**ความดันไอระหว่าง 20-25 องศาเซลเซียส** โดยการจัดเตรียมตัวอย่างในขวดขนาดเล็ก ปริมาณเพียงพอสำหรับแต่ละอุณหภูมิ เวลา และทำการวางขวดแก้วขนาดเล็กลงในเครื่องวัดสารตัวอย่างอัตโนมัติชนิดเฮดสเปซ (headspace) ตั้งอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำการทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นให้โปรแกรมเฮดสเปซฉีดก๊าซเข้าเครื่องวิเคราะห์เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) เพื่อวัดจุดสูงสุดของสารระเหย วัดพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของสารในตัวอย่างและเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ทราบค่า (calibration standard) เพื่อบำบัดความเข้มข้นในพื้นที่ว่างเหนือของเหลวหรือของแข็งภายในภาชนะปิด (โมลต่อลูกบาศก์เมตร) ดังสมการที่ 2

$$P = cRT$$

สมการที่ 2

โดยที่  $P$  = ความดันย่อย (ปาสกาล)

$c$  = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในรูปไอ (ก๊าซ) ภายในช่องว่างเหนือของตัวอย่างในภาชนะปิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

$R$  = ค่าคงที่แก๊ส (8.314 จูลต่อโมลเคลวิน)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

**การทดสอบการกักต้อน** จุ่มเม็ดปุ๋ยลงในสารละลายแต่ละชนิดในภาชนะแยกกันและใช้ฝาหรือพลาสติกปิดสนิทเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและการระเหยของสาร จากนั้นเก็บภาชนะให้อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยควบคุมให้น้ำในสารละลายครอบคลุมเม็ดปุ๋ยและขึ้นตัวอย่างทั้งหมด เมื่อครบระยะเวลา 7, 14 หรือ 28 วัน นำชิ้นตัวอย่างออกจากสารละลายล้างเบา ๆ ด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้ง จากนั้นถ่ายภาพพื้นผิวก่อนและหลังการทดสอบ ทำความสะอาดและชั่งน้ำหนักก่อน ( $W_i$ ) และหลัง ( $W_f$ ) การกักต้อน และคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก ( $\Delta W = W_i - W_f$ ) และอัตราการกักต้อน ตามสูตรที่กำหนด

### การทดสอบปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ

ทำการทดสอบหาปริมาณธาตุสำคัญ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซิลิเคอร์ เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสงแบบพลาสมาเหนี่ยวนำ (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES) และวิเคราะห์ไนโตรเจน โดยใช้วิธีเคลดาล์ (Kjeldahl method)

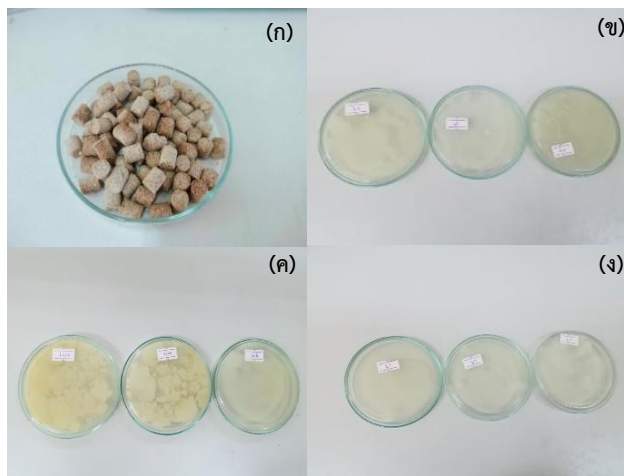
### การทดสอบการใช้งานจริง

การทดสอบการเพาะปลูกดำเนินการโดยนำปุ๋ยชีวภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการปลูกผัก ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง ภายใต้สภาพการปลูกจริง ณ อาร์อร์แกนิคฟาร์ม อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 1 เดือน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของปุ๋ยชีวภัณฑ์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ทำการศึกษานี้ใช้การจัดทรีตเมนต์แบบแฟกทอเรียล (factorial arrangement) และวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ขนาด  $3 \times 2$  เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดพืชและรูปแบบการใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยประกอบด้วย 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 ชนิดของพืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง ปัจจัยที่ 2 รูปแบบการใช้สารชีวภัณฑ์ผสมกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวและการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ผสมสารชีวภัณฑ์ จากการรวมปัจจัยข้างต้น ทำให้มีรูปแบบการทดลองทั้งหมด 6 รูปแบบ (treatments) โดยแต่ละรูปแบบการทดลองมีจำนวนซ้ำทั้งหมด 100 ซ้ำ รวมหน่วยทดลองทั้งสิ้น 600 ต้น โดยทำการเก็บข้อมูลความยาวต้นและน้ำหนักต้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (multivariate analysis of variance, MANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างในภาพรวมของตัวแปรตามระหว่างกลุ่มทดลองทั้ง 6 รูปแบบ และหากพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) แยกตามแต่ละตัวแปรตาม เพื่อพิจารณาความแตกต่างอย่างละเอียด พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยใช้โปรแกรมทางสถิติสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 26 ในการคำนวณผล

### ผลการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างการขึ้นรูปปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ที่ผสมเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ในตัวอย่างซีเลื่อยยางพาราและขี้ข้าวโพด

จากการทดสอบอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* หลังจากบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยลักษณะการอัดเม็ดปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ที่มีเชื้อแบคทีเรีย (ภาพที่ 1ก) และเมื่อทดสอบปริมาณการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียมีระดับความเข้มข้นที่  $6.3 \times 10^6$  CFU/g (ภาพที่ 1ข-ง)



ภาพที่ 1 (ก) ลักษณะเม็ดสารชีวภัณฑ์จากเชื้อแบคทีเรียที่มาจากตัวอย่างสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด (ข) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 1 เดือน (ค) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 2 เดือน (ง) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 3 เดือน

### การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด

#### การทดสอบลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพและเคมี

ลักษณะทางกายภาพของสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดเป็นทรงกระบอก ผิวด้านนอกมีลักษณะการเคลือบสารไฮโดรเจล มีสีน้ำตาลอ่อนเทา มีกลิ่นคล้ายวัสดุอินทรีย์ธรรมชาติ คล้ายกลิ่นหมักอ่อน ๆ ที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย และในส่วนของคุณลักษณะสีที่ปรากฏของสารชีวภัณฑ์ ได้ดำเนินการวิเคราะห์โดยนำสารสกัดที่เตรียมจากขิงข้าวโพดไปวัดค่าสีเครื่องวัดสี รายงานผลตามมาตรฐาน CIE โดยรายงานเป็นหน่วยสี CIE  $L^*a^*b^*$  โดย  $L^*$  บ่งบอกความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว)  $a^*$  บ่งบอกเฉดสี ( $-a^*$  = เขียว,  $+a^*$  = แดง)  $b^*$  บ่งบอกโทนสี ( $-b^*$  = น้ำเงิน,  $+b^*$  = เหลือง) พบลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน ดังตารางที่ 1 และในส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัดขิงข้าวโพดมีค่าเท่ากับ  $5.30 \pm 0.000$

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าสีของสารสกัดขิงข้าวโพดและสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด

| ตัวอย่าง          | ค่าวิเคราะห์ค่าสี (mean $\pm$ S.D) |                   |                    |                    |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|                   | $L^*$                              | $a^*$             | $b^*$              | $\Delta E^*$       |
| ขิงข้าวโพด        | $17.52 \pm 2.04^c$                 | $8.25 \pm 1.25^a$ | $19.40 \pm 2.15^a$ | $3.21 \pm 0.39^c$  |
| สารสกัดขิงข้าวโพด | $22.17 \pm 1.43^a$                 | $2.26 \pm 1.43^b$ | $7.95 \pm 1.83^b$  | $12.03 \pm 1.43^b$ |

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าสีของสารสกัดขิงข้าวโพดและสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด (ต่อ)

| ตัวอย่าง                 | ค่าวิเคราะห์ค่าสี (mean $\pm$ S.D) |                              |                              |                                |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                          | L*                                 | a*                           | b*                           | $\Delta E^*$                   |
| 3% สารมอล<br>โทเดกซ์ทรีน | 21.75 $\pm$ 1.10 <sup>ab</sup>     | 2.47 $\pm$ 0.56 <sup>b</sup> | 7.81 $\pm$ 1.27 <sup>b</sup> | 13.12 $\pm$ 1.71 <sup>a</sup>  |
| 5% สารมอล<br>โทเดกซ์ทรีน | 22.10 $\pm$ 1.38 <sup>a</sup>      | 2.25 $\pm$ 0.66 <sup>b</sup> | 6.94 $\pm$ 1.02 <sup>b</sup> | 14.08 $\pm$ 1.64 <sup>a</sup>  |
| 7% สารมอล<br>โทเดกซ์ทรีน | 21.23 $\pm$ 1.22 <sup>b</sup>      | 2.86 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup> | 7.90 $\pm$ 1.00 <sup>b</sup> | 12.69 $\pm$ 1.55 <sup>ab</sup> |

#### การทดสอบการระคายเคืองโดยการศึกษาเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์

ผลการทดสอบการระคายเคืองโดยประเมินจากเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์พบว่า สารสกัดจากตัวอย่างทุกระดับความเข้มข้น (25–100 เปอร์เซ็นต์) แสดงการระคายเคืองในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยมีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์อยู่ในช่วง 46.44–59.16 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดลดลง ขณะที่ตัวอย่างควบคุมบวกแสดงการระคายเคืองรุนแรงด้วยเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์ต่ำมาก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบการระคายเคือง

| ตัวอย่าง                           | เชิงคุณภาพ<br>(เกรด) | เชิงปริมาณ<br>% การรอดชีวิตของเซลล์<br>เฉลี่ย $\pm$ S.D. |
|------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
| สารสกัดจากตัวอย่าง 100 เปอร์เซ็นต์ | 2                    | 46.44 $\pm$ 2.78                                         |
| สารสกัดจากตัวอย่าง 75 เปอร์เซ็นต์  | 2                    | 52.78 $\pm$ 2.03                                         |
| สารสกัดจากตัวอย่าง 50 เปอร์เซ็นต์  | 2                    | 57.41 $\pm$ 1.72                                         |
| สารสกัดจากตัวอย่าง 25 เปอร์เซ็นต์  | 2                    | 59.16 $\pm$ 2.96                                         |
| ตัวอย่างควบคุม                     | 0                    | 100.00                                                   |
| ตัวอย่างควบคุมลบ                   | 0                    | 95.68 $\pm$ 0.90                                         |
| ตัวอย่างควบคุมบวก                  | 4                    | 0.09 $\pm$ 0.30                                          |

#### การทดสอบสารพิษตกค้างจำนวน 7 กลุ่ม

การทดสอบสารพิษตกค้างจำนวน 7 กลุ่ม ได้แก่ organochlorine group, organophosphate group, pyrethroid group, carbamate group, multiresidue, paraquat และ glyphosate พบว่าไม่มีสารพิษตกค้างในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจำนวน 7 กลุ่ม

| สารพิษตกค้าง          | ผลการทดสอบ | หน่วย                | LOD  | LOQ  |
|-----------------------|------------|----------------------|------|------|
| organochlorine group  | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| organophosphate group | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| pyrethroid group      | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| carbamate group       | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| multiresidue          | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| paraquat              | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |
| glyphosate            | ตรวจไม่พบ  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | 0.05 | 0.10 |

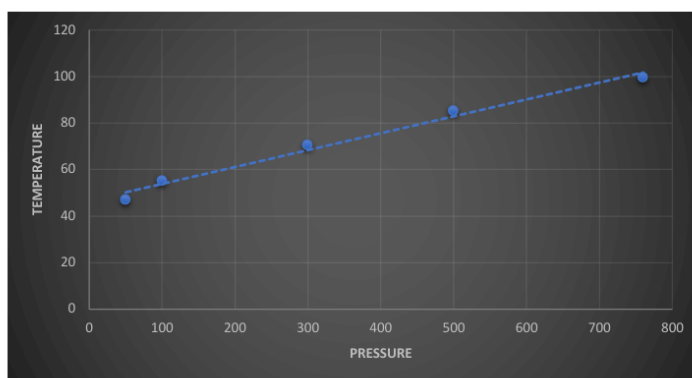
การทดสอบจุดละลายในตัวอย่งสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่เหมาะสมต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

การศึกษาปริมาณจุดเดือดของตัวอย่างสารชีวภัณฑ์

ทำการนำตัวอย่างปุ๋ยชีวภัณฑ์ลงในเครื่องวัดจุดเดือดและวางในตำแหน่งที่เหมาะสมเปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) เพื่อเพิ่มความร้อนอย่างช้า ๆ พร้อมทั้งสังเกตค่าอุณหภูมิบนเทอร์โมมิเตอร์อย่างใกล้ชิด เมื่อของเหลวเริ่มเดือดอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิไว้ หลังจากนั้นทำการวัดจุดเดือดภายใต้สภาวะแรงดันลด โดยเชื่อมต่อบระบบเข้ากับเครื่องวัดสุญญากาศ เพื่อควบคุมและลดแรงดันภายในระบบให้ได้ตามค่าที่ต้องการ เช่น 50, 100 หรือ 200 มิลลิเมตรปรอท ในระหว่างการทดลองต้องควบคุมแรงดันให้คงที่และสังเกตลักษณะการระเหยหรือการเดือดของสารอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำค่าจุดเดือดที่วัดได้ภายใต้แรงดันต่าง ๆ มาแปลงค่าให้เทียบเท่ากับจุดเดือดที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ โดยใช้สมการ Clausius–Clapeyron หรืออ้างอิงจากข้อมูลเชิงทดลองที่เหมาะสม ผลที่ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การศึกษาจุดเดือดของตัวอย่างปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด

| ความดัน<br>(มิลลิเมตรปรอท) | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ผลการทดสอบ                                |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| 760                        | 99.5                       | จุดเดือดที่บรรยากาศปกติ                   |
| 500                        | 85.2                       | ความดันลดลง ทำให้จุดเดือดต่ำลง            |
| 300                        | 70.4                       | เริ่มแสดงการลดลงของอุณหภูมิจุดเดือด       |
| 100                        | 55.0                       | ใกล้จุดต่ำสุดในการระเหยในสภาวะแรงดันต่ำ   |
| 50                         | 47.0                       | สารเริ่มสลายหรือเจือปนในสถานะแรงดันต่ำสุด |



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ โดยแกน Y คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) แกน X คือ ความดัน (มิลลิเมตรปรอท) และจุดวัดแต่ละจุดเชื่อมต่อกันเป็นแนวเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และอุณหภูมิ

#### ความดันไอระหว่าง 20–25 องศาเซลเซียส

จากผลแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 25 องศาเซลเซียส ความดันไอสารเพิ่มขึ้นประมาณ 4 ปาสกาล (จาก 16.6 เป็น 20.8 ปาสกาล) ค่าความดันย่อยที่วัดได้แสดงว่าสารในตัวอย่างมีความดันไอบริเวณ 16.6–20.8 ปาสกาล ที่อุณหภูมิ 20–25 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่าสารมีความสามารถในการระเหยในอุณหภูมิห้องพอสมควร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการทดสอบความดันไอระหว่าง 20–25 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | พื้นที่ได้<br>พิก | ค่าความเข้มข้นในเฮกสเปซ<br>(โมลต่อลูกบาศก์เมตร) | ความดันย่อย<br>(ปาสกาล) |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| 20.0                       | 1500              | 0.002                                           | 16.6                    |
| 25.0                       | 2200              | 0.003                                           | 20.8                    |

#### การทดสอบการกัดกร่อน

จากผลการทดสอบพบว่า ปุ๋ยอัดเม็ดที่ทดสอบมีอัตราการกัดกร่อนประมาณ 0.3 มิลลิเมตรต่อปี ในสภาพแวดล้อมที่เป็นสารละลายปุ๋ยและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโลหะทั่วไปในสภาพแวดล้อมเดียวกัน เช่น เหล็กกล้าที่มีค่าการกัดกร่อนประมาณ 1–2 มิลลิเมตรต่อปี ในสภาพแวดล้อมน้ำเค็มหรือมีออกซิเจนสูง

#### การทดสอบปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ

จากการศึกษาปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ดผสมเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* พบว่า มีปริมาณจำนวน 6 กลุ่มหลัก ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 696.7, 199.3, 143.3, 1146, 148.4 และ 0.118 มิลลิกรัมต่อกรัม กิโลกรัม ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบปริมาณสารสำคัญในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์     | หน่วย                | เครื่องมือ/วิธีการ<br>ทดสอบ | ปริมาณธาตุ<br>อาหาร |
|----------|-----------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1        | แคลเซียม (Ca)   | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | ICP-OES                     | 696.7               |
| 2        | แมกนีเซียม (Mg) | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | ICP-OES                     | 199.3               |
| 3        | ฟอสฟอรัส (P)    | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | ICP-OES                     | 143.3               |
| 4        | โพแทสเซียม (K)  | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | ICP-OES                     | 1146                |
| 5        | ซัลเฟอร์ (S)    | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | ICP-OES                     | 148.4               |
| 6        | ไนโตรเจน (N)    | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม | Kjeldahl method             | 0.118               |

### การทดสอบการใช้งานจริง

จากการนำสารชีวภัณฑ์ที่ผลิตออกมาจำหน่ายใช้เพาะปลูกผัก ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง โดยทำการปลูกจำนวน 2 แปลง ด้วยกันเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้ฟาร์มอาร์ออร์แกนิก อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยมีการเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ผสมกับสารชีวภัณฑ์ โดยทำการศึกษาเป็นจำนวน 600 ต้น แบ่งแปลงละ 300 ต้น โดยการแบ่งผักสลัดสีเขียว จำนวน 100 ต้น ต่อแปลง ผักสลัดโรเมน จำนวน 100 ต้น และผักสลัดสีแดง จำนวน 100 ต้น โดยแบ่งเป็นจำนวน 2 ซ้ำ ซ้ำละ 100 ต้น พบว่ามีความสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นพืชได้ดี

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบทางเดียวพบว่า กลุ่มการทดลองทั้ง 6 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในด้านความยาวต้นและน้ำหนักต้นสด (Wilks' lambda = 0.218,  $F(10, 1186) = 135.48$ ,  $p < 0.001$ ) และในส่วนรูปแบบการทดลอง (group) ส่งผลต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พบว่าน้ำหนักต้นมีค่า  $F = 311.132$  และค่า partial eta squared = 0.724 ซึ่งสูงมากเมื่อทำการเปรียบเทียบจากตารางที่ 7 แสดงว่าปัจจัยด้านชนิดพืชและรูปแบบการใส่สารชีวภัณฑ์ส่งผลต่อน้ำหนักของพืชได้อย่างชัดเจนกว่าความยาวต้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า partial eta squared = 0.338 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลของชนิดพืช สูตรปุ๋ย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นของพืช

| Effect     | df | F       | sig. (p) | partial eta squared |
|------------|----|---------|----------|---------------------|
| ความยาวต้น | 5  | 60.547  | 0.00     | 0.338               |
| น้ำหนัก    | 5  | 311.132 | 0.00     | 0.724               |

จากการผลของสารชีวภัณฑ์ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์พืชพบว่า ผักสลัดโรเมนให้ค่าเฉลี่ยด้านความยาวต้นสูงสุด (27.730 เซนติเมตร) และน้ำหนักต้นสดสูงสุด (264.858 กรัม) ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มผักสลัดสีเขียว รองลงมา คือ ผักสลัดสีเขียวเมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยสารชีวภัณฑ์จะให้น้ำหนักสดสูงถึง 248.013 กรัม ซึ่งมีความสูงกว่าชุดการทดสอบอื่นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการปลูกโดยใช้ปุ๋ย

อินทรีย์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้ปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวในทุกชนิดพืช โดยเฉพาะในผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีเขียว และในส่วนผลของปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวเกือบทุกชนิด และเมื่อปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว ผักสลัดสีแดงจะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะในด้านน้ำหนักต้นสดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีค่าเฉลี่ย 113–125 กรัม ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความยาวต้นและน้ำหนักสดของผักที่ใช้ในการใส่ปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ผสมปุ๋ยอินทรีย์และใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว

| ตัวอย่าง       | ความยาวต้น (เซนติเมตร)         |                           | น้ำหนักต้นสด (กรัม)            |                             |
|----------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
|                | ใส่ปุ๋ยชีวภัณฑ์ + ปุ๋ยอินทรีย์ | ปุ๋ยอินทรีย์              | ใส่ปุ๋ยชีวภัณฑ์ + ปุ๋ยอินทรีย์ | ปุ๋ยอินทรีย์                |
| ผักสลัดสีเขียว | 23.69 ± 2.15 <sup>b</sup>      | 22.17 ± 5.43 <sup>c</sup> | 248.01 ± 56.24 <sup>b</sup>    | 113.28 ± 19.17 <sup>c</sup> |
| ผักสลัดโรเมน   | 27.73 ± 2.10 <sup>a</sup>      | 23.96 ± 2.13 <sup>b</sup> | 264.85 ± 58.72 <sup>a</sup>    | 125.09 ± 45.82 <sup>c</sup> |
| ผักสลัดสีแดง   | 21.69 ± 2.15 <sup>c</sup>      | 21.68 ± 2.15 <sup>c</sup> | 163.96 ± 77.25 <sup>c</sup>    | 115.11 ± 21.02 <sup>c</sup> |



ภาพที่ 3 ลักษณะแปลงเพาะปลูกผักที่ใช้ปุ๋ยชีวภัณฑ์ผสมปุ๋ยอินทรีย์และใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว  
(ก) ลักษณะแปลงปลูกผักสลัดในโรงเรือนทั้งสองแปลง (ข) ลักษณะของผักสลัดสีแดง  
(ค) ลักษณะของผักสลัดโรเมน (ง) ลักษณะของผักสลัดสีเขียว

## อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชีวเสี้ยว ยางพาราและซังข้าวโพดเป็นตัวกลางในการตรึงเชื้อ *B. subtilis* ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการเจริญเติบโต และการคงอยู่ของจุลินทรีย์ได้ดี โดยมีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อเท่ากับ  $6.3 \times 10^6$  cfu/g ภายในระยะเวลา 3 เดือน สะท้อนถึงความเหมาะสมของวัสดุตัวกลาง (ชีวเสี้ยว ยางพาราและซังข้าวโพด) ในการพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bolan และคณะ [9] ที่ได้มีการนำไบโอชาร์เป็นตัวตรึงของเชื้อแบคทีเรียในรูปแบบพาหะที่มีประสิทธิภาพสำหรับจุลินทรีย์ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะและการคงอยู่ของเชื้อในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ การเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดในอัตราส่วนที่เหมาะสม (1:1) ช่วยเพิ่มความสามารถในการปกป้องเซลล์และควบคุมการปลดปล่อยจุลินทรีย์อย่างช้าและสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการตรึงหรือห่อหุ้มจุลินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและยืดอายุการใช้งานของเชื้อ นอกจากนี้ยังช่วยให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในดินผลการทดสอบด้านความปลอดภัยไม่พบสารพิษตกค้างในกลุ่มสารเคมีทั้ง 7 กลุ่ม รวมถึงโลหะหนัก แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาสารชีวภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปลอดภัยต่อผู้ใช้ และระบบนิเวศในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล ความแข็งปานกลาง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน อีกทั้งยังมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช เช่น ไนโตรเจน (0.118 mg/kg) ฟอสฟอรัส (143.3 mg/kg) โพแทสเซียม (1146 mg/kg) แคลเซียม (696.7 mg/kg) และ แมกนีเซียม (199.3 mg/kg) ซึ่งช่วยเสริมบทบาทของผลิตภัณฑ์ให้เป็นทั้งพาหะของจุลินทรีย์และแหล่งธาตุอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anggraini และคณะ [10] ที่รายงานว่าปุ๋ยที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืช ได้ผลการทดสอบภาคสนามพบว่า การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับสารชีวภัณฑ์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของผักสลัดทั้ง 3 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยเฉพาะด้านน้ำหนักต้นซึ่งมีค่าอิทธิพลสูงที่สุดและยังช่วยลดอัตราการเกิดโรคได้อย่างชัดเจน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [11] ที่รายงานว่าเชื้อ *Bacillus* สามารถผลิตเอนไซม์และสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรคพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการรอดชีวิตของเชื้อซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia และคณะ [12] ที่พบว่าการใช้วัสดุพาหะที่เหมาะสมสามารถช่วยรักษาปริมาณเชื้อ *B. subtilis* ให้อยู่ในระดับสูงได้เป็นเวลานานภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

## สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาปุ๋ยสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยใช้เศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชีวเสี้ยว ยางพารา และซังข้าวโพด เป็นวัสดุตัวกลางสำหรับตรึงเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ผลการทดลองพบว่าวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของเชื้อได้ดี โดยหลังการเก็บรักษา 3 เดือน ยังคงมีปริมาณเชื้ออยู่ที่  $6.3 \times 10^6$  CFU/g แสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแรง สมำเสมอ และเหมาะสมต่อการขนส่งและการใช้งานจริง รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนและไม่พบสารพิษตกค้างหรือโลหะหนักทำให้มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุอาหารพบว่าผลิตภัณฑ์มี



- [10] Anggraini, R. A., Kurniati, M., Winarti, C. & Iramansyah, I. (2021). The release of fertilizer on corncob cellulose – based acid- acrylamide hydrogel prepared by chemical cross-binding method. *Journal Reaktor*, 21(3), 109–115.
- [11] Chen, T. Y., Tzean, Y., Chang, T. D., Wang, X. R., Yang, C. M. & Lin, Y. H. (2024). Characterization of biofertilization and biocontrol potential of *Bacillus velezensis* KHH13 from organic soils. *Agronomy*, 14(6), 1–17
- [12] Jia, H., Lv, X., Sohail, M. A., Huang, B. & Wang, J. (2022). Control efficiency of biochar Loaded with *Bacillus subtilis* Tpb 55 against tobacco black shank. *Processes*, 10(12), 1–12.

การยกระดับโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมด้วยเทคโนโลยีไอโอที: กรณีศึกษา  
วิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ  
Enhancing Oyster Mushroom Greenhouses Using IoT Technology:  
A Case Study of Ban Suan Mae Tha Mushroom Cultivation and  
Processing Community Enterprise

วารภรณ์ ทุมชาติ, ศุภวุฒิ ผากา\*, ประสงค์ นน่อแก้ว และ วราคม วงศ์ชัย  
Waraporn Tumchat, Suphawut Paka\*, Prasong Norkaew & Warakhom Wongchai

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
Industrial Electrical Engineering Program, Faculty of Industrial Technology,  
Lampang Rajabhat University

Submitted 30/03/2026 ; Revised 07/05/2026 ; Accepted 03/06/2026

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ จังหวัดลำปาง มีการปรับปรุงคานรับน้ำหนักก่อนเห็ดทำให้โรงเรือนบรรจุเห็ดได้เพิ่มขึ้น 4,150 ก้อน การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอที ประกอบด้วยเซนเซอร์ DHT22 ประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ส่งการผ่านรีเลย์ควบคุมปั้มน้ำพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศ แสดงข้อมูลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ปรับปรุงระบบแสงสว่างเพื่อกระตุ้นการออกดอกของเห็ด การเพาะเห็ดในเดือนตุลาคมถึงธันวาคม ผลการประเมินประสิทธิภาพพบว่าระบบสามารถรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 12–32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 70–87 ผลการวิจัยบ่งชี้ว่าโรงเรือนต้นแบบมีผลผลิตเฉลี่ยต่อ 1,000 ก้อน เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.7 เมื่อเทียบกับโรงเรือนแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.011$ ) ผลผลิตจากก้อนเห็ด 10,000 ก้อน ทำให้มีรายได้สองเดือนเพิ่มขึ้น 83,950 บาท ผลประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการเพาะเห็ดในระยะเวลา 4 เดือน/รอบ/ปี มีระยะเวลาคืนทุน 1.63 ปี

**คำสำคัญ:** โรงเรือนเพาะเห็ด ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ไอโอที

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: suphawut\_p@g.lpru.ac.th

## Abstract

The primary aim of this research was to design and develop an automated temperature and humidity control system for a prototype mushroom greenhouse at the Ban Suan Mae Tha Community Enterprise in Lampang Province. Structural modifications to the load-bearing beams were implemented, increasing the greenhouse capacity by 4,150 blocks. The control system integrates IoT technology, using DHT22 sensors and an ESP8266 microcontroller to regulate misting pumps and ventilation fans via relays, while presenting data through the Blynk application. The lighting system was enhanced to promote mushroom fruiting. Performance evaluations conducted from October to December demonstrated that the system maintained temperature within the range of 12–32°C and relative humidity within the range of 70–87%. The results indicated that the prototype achieved a 20.7% increase in average yield per 1,000 blocks relative to conventional greenhouses, a finding that was statistically significant ( $p < 0.011$ ). An economic analysis of 10,000 blocks indicated additional income of 83,950 THB over two months. The system had a payback period of 1.63 years, based on a four-month annual production cycle.

**Keywords:** mushroom greenhouse, temperature and humidity control system, IoT

## บทนำ

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะจังหวัดลำปาง ตั้งอยู่บ้านแม่ทะ ตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง เป็นการรวมกลุ่มแม่บ้านของเกษตรกรในชุมชน โดยมีนางณัฐกานต์ วรรณทัศน์ เป็นประธานกลุ่ม ดำเนินงานเพาะและแปรรูปเห็ดครบวงจร โดยเห็ดที่หมวนเวียนเพาะปลูก ได้แก่ เห็ดนางรมเทา เห็ดนางรมฮังการี เห็ดนางฟ้าภูฐาน เป็นหลัก เพื่อจำหน่ายในรูปแบบเห็ดสดและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ได้แก่ แหนมเห็ด ข้าวเกรียบเห็ด น้ำพริกเห็ด เห็ดแดดเดียว เห็ดสวรรค์ และเห็ดทอดกรอบ จากการเข้าสำรวจพื้นที่เก็บข้อมูลของคณะวิจัยได้พบประเด็นปัญหาในส่วนของโรงเพาะเห็ดพบว่า โครงสร้างเดิมที่เป็นไม้ ได้มีการผุพังและไม่สามารถรับน้ำหนักก่อนเห็ดได้ ต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างในทุก 1-2 ปี ซึ่งเป็นภาระค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นตามอัตราค่าวัสดุและค่าแรงที่เพิ่มขึ้นทุกปี และประเด็นของกระบวนการเพาะเห็ดในส่วนของ การให้ความชื้นในโรงเพาะเห็ดด้วยวิธีการรดน้ำก่อนเห็ดโดยใช้สายยางฉีดน้ำ โดยไม่มีการควบคุมปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมซึ่งส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพผลผลิตเห็ดที่ผลิตได้เห็ดบางส่วนเกิดการช้ำ เน่าเสีย จากแรงฉีดน้ำของสายยาง การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนได้ไม่ดียังส่งผลต่อปริมาณผลผลิตและความสมบูรณ์ของดอกเห็ดซึ่งมีผลต่อราคาขายที่ต่ำลงโดยตรง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพเห็ดคือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ การเพาะเห็ดเบื้องต้นของกรมส่งเสริมการเกษตรในเห็ดสกุลนางรม เช่น นางรม ฮังการี ภูฐาน การดูแลในโรงเรือนเพื่อให้เกิดดอกอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20-32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70-90 ความต้องการแสงเล็กน้อย การถ่ายเทอากาศดี การให้ความชื้นไม่ควรให้น้ำซึ่งภายในก้อนเชื้อและไม่ควรให้น้ำถูกดอกเห็ดโดยตรง [1] จากการพัฒนาระบบควบคุมในโรงเรือนเพาะเห็ดสกุลนางรม ระบบที่ควบคุมอุณหภูมิ 15-35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 80-85 ผลคือโรงเรือนควบคุมให้ปริมาณน้ำหนักดอกเห็ดมากกว่า โดยมีข้อเสนอแนะให้มีช่องระบายอากาศและแสงสว่างเหมาะสมที่เพียงพอ [2] ระบบที่ควบคุมอุณหภูมิให้ไม่สูงเกิน 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70-80 ในโรงเรือนควบคุมให้ผลผลิตมากกว่า [3] จากผลการศึกษาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตเห็ดในระยะเปิดดอกสองปัจจัยแรกสำคัญที่สุดคือ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70-90 และอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิน 1,000 พีพีเอ็ม ความเข้มแสงไม่เกิน 500 ลักซ์ [4] การพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมโรงเรือนเพาะปลูกเห็ดทำให้สามารถตรวจจับอุณหภูมิ ความชื้น อากาศ และแสงสว่าง ทำให้โรงเรือนมีสภาพแวดล้อมต่อการเพาะปลูกตลอดเวลา โดยมีการควบคุมอุณหภูมิให้ไม่สูงเกิน 33 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70-80 [5] ซึ่งสอดคล้องกับระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) ช่วยควบคุมปัจจัยภายในโรงเรือนเพาะเห็ดให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 33 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70-80 [6] และผลจากการพัฒนาตู้เพาะเห็ดที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25-33 องศาเซลเซียส ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 70-90 มีอัตราการงอกและเจริญเติบโตดีกว่า ดอกเห็ดมีลักษณะสมบูรณ์กว่า เก็บผลผลิตได้ในปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น [7] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบโรงเรือนที่ควบคุมความชื้นที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 80.70 โดยใช้ระบบพ่นหมอก ดอกเห็ดมีลักษณะดี มีคุณภาพกว่าโรงเรือนที่ไม่ควบคุมความชื้น [8] การควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนที่เหมาะสมต่อการผลิต

ดอกเห็ดส่งผลให้ระยะเวลาช่วงการเก็บผลผลิตเห็ดนานขึ้น เห็ดมีน้ำหนักดี ดอกอวบอึมน้ำ เจริญเติบโตสม่ำเสมอ [9] และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อัตราการสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อเห็ดนางฟ้าหลังการเก็บเกี่ยวของโรงเรือนปกติสูงกว่าจากโรงเรือนอีแวป (evap) ผลผลิตเห็ดที่ได้จากโรงเรือนอีแวปมีสภาพดอกสมบูรณ์กว่าเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และการไหลเวียนอากาศภายในโรงเรือนได้ดีกว่าโรงเรือนปกติ [10] การนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ควบคุมปัจจัยสำคัญที่เหมาะสมต่อการผลิตดอกเห็ด ส่งผลต่อคุณภาพและปริมาณดอกเห็ดที่ผลิตได้

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ จังหวัดลำปาง ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการวิเคราะห์ปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้น ปรับปรุงแสงสว่างภายในโรงเรือน ที่มีผลต่อผลผลิตดอกเห็ด ประเมินประสิทธิภาพของโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบจากปริมาณและคุณภาพของเห็ดที่ผลิตได้ เปรียบเทียบกับโรงเรือนเพาะเห็ดรูปแบบเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน เป็นการยกระดับโรงเรือนเพาะเห็ดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ท้องถิ่นของจังหวัดลำปาง ด้วยการนำเทคโนโลยีไอโอทีมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบการผลิตให้มีคุณภาพและเพิ่มปริมาณผลผลิตได้มากขึ้นและนำไปสู่การเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในชุมชนท้องถิ่นต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างคานรับน้ำหนักก้อนเห็ดแบบแขวนแนวตั้ง
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ จังหวัดลำปาง
3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### การออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างคานรับน้ำหนักก้อนเห็ดแบบแขวนแนวตั้ง

จากการสำรวจโรงเพาะเห็ดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะพบว่าโรงเรือนจำนวน 10 โรง ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโรงเพาะเห็ดต้นแบบจำนวน 1 โรง ออกแบบติดตั้งระบบและทดสอบการควบคุมอุณหภูมิความชื้นในโรงเรือนขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 15 เมตร สูง 2 เมตร คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบปรับปรุงโรงเพาะเห็ดเพื่อยกระดับโรงเพาะเห็ดให้เหมาะสมกับการติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลผลิตเห็ด และคานรับน้ำหนักก้อนเห็ดแบบแขวนแนวตั้งแสดงแบบโรงเรือน โครงสร้างคานรับน้ำหนักก้อนเห็ดก่อนและหลังปรับปรุงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 (ก) แบบโรงเรือนขนาด 5 x 15 x 2 เมตร (ข) โครงสร้างคานรับน้ำหนักก่อนและหลังปรับปรุง

จากการปรับปรุงโครงสร้างโรงเรือนก่อนปรับปรุงบรรจุก้อนเห็ดได้ประมาณ 5,850 ก้อน และโครงสร้างโรงเรือนหลังปรับปรุงคานรับน้ำหนักก้อนเห็ด สามารถบรรจุก้อนเห็ดได้เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 10,000 ก้อน เนื่องจากคานเหล็กสามารถรับน้ำหนักก้อนเห็ดได้มากกว่าคานไม้แบบเดิม

#### การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ

การรดน้ำก้อนเห็ดภายในโรงเรือนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ใช้แรงงานคนในการปฏิบัติงาน โดยการเปิดน้ำจากท่อผ่านสายยางรดน้ำก้อนเห็ดโดยตรง เพื่อให้ความชื้นภายในโรงเรือนและก้อนเห็ด ลักษณะของน้ำมีความขุ่น มีตะกอน มวลน้ำโดนดอกเห็ดโดยตรง จากวิธีการรดน้ำส่งผลให้ดอกเห็ด ขำ น้ำเข้าก้อน และสิ่งสกปรกเข้าก้อนเห็ดได้ง่าย ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ด คุณภาพดอกเห็ด ก้อนเห็ดเป็นโรคจากเชื้อราลักษณะเชื้อรามีสีเขียว สีดำ สีส้ม หรือสีเหลือง แล้วแต่ชนิดของเชื้อรา ส่วนระยะเวลาและปริมาณน้ำที่รดใช้การประมาณด้วยการสังเกตจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งแต่ละบุคคลไม่เท่ากัน ไม่คงที่ และไม่แน่นอน (ภาพที่ 2ก, ข) หากการนำระบบพ่นหมอกเข้ามาใช้จะช่วยให้ความชื้นภายในโรงเรือนสม่ำเสมอ ลดการขำของดอกเห็ดที่เกิดจากการโดนน้ำโดยตรง ลดโอกาสที่น้ำเข้าก้อนเห็ด ควบคุมความชื้น ปริมาณน้ำที่ใช้ และลดการใช้แรงงานคน การออกแบบระบบพ่นหมอกใช้ปั้มน้ำส่งแรงดันน้ำออกทางหัวพ่นฝอย โดยเลือกใช้หัวพ่นขนาดเล็ก 0.1–0.3 มิลลิเมตร เพื่อให้มีละอองฝอยแบบหมอกในการรดน้ำให้ความชื้นภายในโรงเพาะเห็ดได้ดีที่สุด ดอกเห็ดไม่ขำจากการโดนแรงดันของน้ำปริมาณมากและลดความเสี่ยงเรื่องน้ำเข้าก้อนเห็ด ระยะการติดตั้งหัวพ่นหมอกห่างกันจุดละ 1.2 เมตร ซึ่งเพียงพอต่อรัศมีการกระจายตัวให้ความชื้นของละอองพ่นหมอก ติดตั้งแถวละ 11 จุด ทั้งหมด 6 แถว เลือกใช้ปั้มน้ำไดอะแฟรมดีซี ขนาด 36 โวลต์ แรงดันขณะใช้งาน 70 PSI อัตราการไหล 5.3 ลิตรต่อนาที ซึ่งเพียงพอต่อจำนวนหัวพ่นหมอกทั้งหมด



ภาพที่ 2 (ก) ลักษณะก้อนเห็ดที่เป็นรา (ข) การรดน้ำโดยใช้สายยาง (ค) ให้ความชื้นด้วยการพ่นหมอก

ออกแบบระบบโดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นของโรงเพาะเห็ดต้นแบบ จำนวน 4 จุด ด้วยเซนเซอร์ DHT22 คำนวณค่าเฉลี่ยประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดเงื่อนไขค่าความชื้นและอุณหภูมิเพื่อควบคุมการทำงานของระบบสั่งการงานปั้มน้ำ พัฒลระบบอากาศขนาด 12 นิ้ว 55 วัตต์ จำนวน 2 ตัว สั้งรีเลย์ (relay) ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำในการพ่นหมอก ควบคุมการเปิดปิดพัดลม เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi แสดงผลข้อมูลค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิและความชื้นบนแอปพลิเคชัน Blynk ในสมาร์ตโฟน

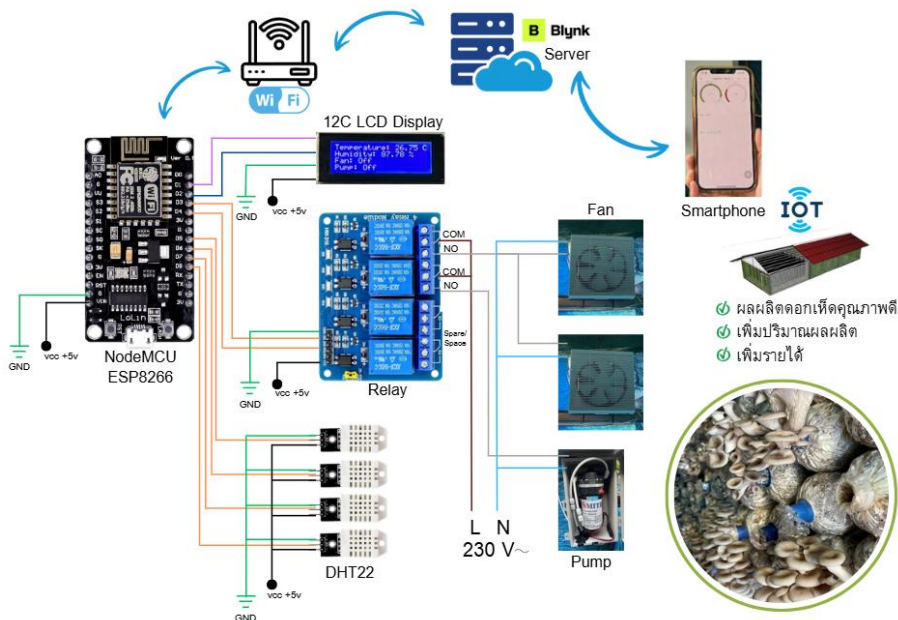


ภาพที่ 3 (ก) ตู้ควบคุมและหน้าจอแสดงผลอุณหภูมิและความชื้น (ข) ติดตั้งพัฒนระบบอากาศ

ติดตั้งหลอดไฟสำหรับการเจริญเติบโตของพืชเพื่อปรับปรุงค่าแสงให้เหมาะสมต่อการเพาะเห็ด ในช่วงของการออกดอกเห็ด แสงที่เหมาะสมมีความจำเป็นในการกระตุ้นให้เส้นใยรวมตัวกันเพื่อให้เกิดดอกเห็ดได้เร็วขึ้นและรูปร่างดอกเห็ดที่สมบูรณ์ [4, 5, 7, 11] โดยตั้งค่าเงื่อนไขการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโรงเพาะเห็ดต้นแบบ ดังตารางที่ 1 และแสดงระบบการทำงาน ดังภาพที่ 5

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทำงานและการทดสอบระบบ

| เงื่อนไขที่ | อุณหภูมิ °C | ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) | สถานะพัดลม | สถานะปั้มน้ำ |
|-------------|-------------|---------------------------|------------|--------------|
| 1           | < 30        | ≥ 82                      | ไม่ทำงาน   | ไม่ทำงาน     |
| 2           | < 30        | < 70                      | ไม่ทำงาน   | ทำงาน        |
| 3           | ≥ 30        | ≥ 82                      | ทำงาน      | ไม่ทำงาน     |
| 4           | ≥ 30        | < 70                      | ทำงาน      | ทำงาน        |



ภาพที่ 4 แผนผังแบบวงจรในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ



ภาพที่ 5 ติดตั้งระบบส่องสว่างปรับปรุงความเข้มแสงภายในโรงเพาะเห็ดต้นแบบ

#### การประเมินประสิทธิภาพของโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ

ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ วัดผลเก็บค่าข้อมูล และปรับปรุงแก้ไขระบบให้เหมาะสมกับการทำงานของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ดที่สมบูรณ์และให้ผลผลิตที่สูงขึ้น วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตดอกเห็ด ทำการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักรวมผลผลิตดอกเห็ดระหว่างโรงเรือนเพาะเห็ดแบบเดิมและโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบที่ติดตั้งระบบฟันทอมก้ออัตโนมัติ ประเมินผลทางสถิติ ประเมินรายได้ที่เพิ่มขึ้นของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การยกระดับโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมด้วยเทคโนโลยีไอโอที: กรณีศึกษา

วิสาหกิจชุมชนเพาะและแปรรูปเห็ดบ้านสวนแม่ทะ

## ผลการวิจัย

ด้านปริมาณผลผลิตดอกเห็ดระหว่างโรงเพาะเห็ดรูปแบบเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกับโรงเพาะเห็ดต้นแบบที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยประเมินผลจากผลผลิตดอกเห็ดนางรมเทาของก้อนเห็ดจำนวนโรงเรือนละ 1,000 ก้อน เนื่องจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนมีกำลังการผลิตก้อนเห็ดพร้อมกันได้ครั้งละ 2,000 ก้อน โดยมีระยะเวลาในการบ่มก้อนเห็ดในการเปิดดอกครั้งแรกประมาณ 30 วัน



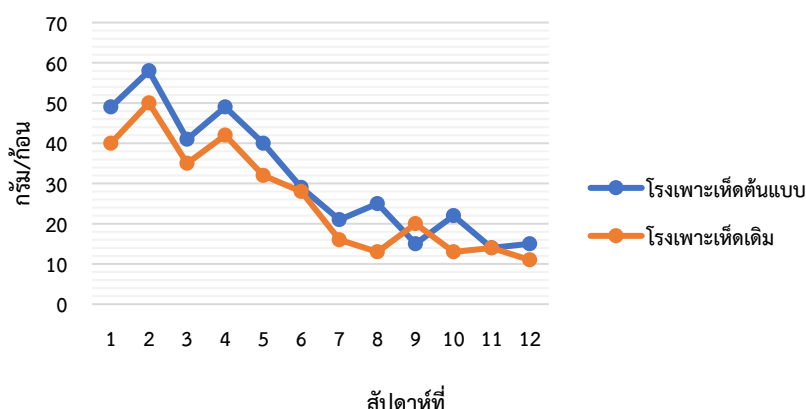
ภาพที่ 6 การจัดเรียงก้อนเห็ดที่พร้อมบ่มภายในโรงเรือนเพาะเห็ดเพื่อบ่มก้อนเห็ดก่อนการเปิดดอก

ตารางที่ 2 ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดสัปดาห์ที่ 1 ถึง 12 ในช่วงเดือน ตุลาคม ถึง ธันวาคม 2568

| สัปดาห์ที่                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9  | 10    | 11 | 12    |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|----|-------|
| ผลผลิตเฉลี่ย (กรัม/ก้อน) ใน โรงเพาะเห็ดเดิม   | 40    | 50    | 35    | 42    | 32    | 28    | 16    | 13    | 20 | 13    | 14 | 11    |
| ผลผลิตเฉลี่ย (กรัม/ก้อน) ใน โรงเพาะเห็ดต้นแบบ | 49    | 58    | 41    | 49    | 40    | 29    | 21    | 25    | 15 | 22    | 14 | 15    |
| ร้อยละการเพิ่ม/ลด                             | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | เพิ่ม | ลด | เพิ่ม |    | เพิ่ม |
|                                               | 22    | 16    | 17    | 16    | 25    | 3     | 31    | 92    | 25 | 69    | 0  | 36    |

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความแตกต่างผลผลิตเฉลี่ยของโรงเพาะเห็ด (สัปดาห์ที่ 1-12)

| โรงเรือนเพาะเห็ด    | n  | $\bar{x}$ | S.D.  | Var ( $\bar{x}$ ) | RMSE | Mean difference | t    | p-value |
|---------------------|----|-----------|-------|-------------------|------|-----------------|------|---------|
| แบบเดิม (ไม่ควบคุม) | 12 | 26.17     | 13.38 | 164.15            | -    |                 |      |         |
|                     |    |           |       |                   |      | 5.42            | 2.67 | 0.011   |
| ต้นแบบ (ควบคุม)     | 12 | 31.58     | 14.93 | 204.45            | 6.99 |                 |      |         |



ภาพที่ 7 กราฟแสดงปริมาณผลผลิตดอกเห็ดเฉลี่ย (กรัมต่อก้อน) สัปดาห์ที่ 1 ถึง 12

ตารางที่ 4 ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ (ต่ำสุด-สูงสุด) ภายในโรงเพาะเห็ด ตุลาคม ถึง ธันวาคม 2568

| ตัวแปร                    | โรงเรือนเพาะเห็ดเต็ม<br>(ใช้สายยางรดน้ำ เช้า กลางวัน เย็น) |           |         | โรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ<br>(ใช้ระบบควบคุม อุณหภูมิ ความชื้น) |           |         |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|-----------|---------|-------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|                           | ตุลาคม                                                     | พฤศจิกายน | ธันวาคม | ตุลาคม                                                      | พฤศจิกายน | ธันวาคม |
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)   | 22 - 36                                                    | 14 - 35   | 13 - 34 | 20 - 32                                                     | 14 - 31   | 12 - 30 |
| ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ) | 39 - 94                                                    | 28 - 94   | 38 - 94 | 70 - 86                                                     | 70 - 87   | 70 - 82 |

โรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติมีประสิทธิภาพในการจัดการสภาพแวดล้อมและสร้างผลผลิตได้ดีกว่าโรงเพาะแบบเดิม โดยโรงเพาะต้นแบบสามารถรักษาอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 32 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าโรงเพาะเดิม และความชื้นสัมพัทธ์ที่มีความเหมาะสมในช่วงร้อยละ 70-87 โดยที่โรงเพาะเดิมมีความผันผวนสูงตามสภาพอากาศ ในวันที่อากาศแห้งความชื้นลดต่ำลงถึงร้อยละ 28 ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นส่งผลต่อปริมาณการออกดอกเห็ดที่เพิ่มขึ้นเห็นได้จากตารางที่ 2 ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดที่เพิ่มขึ้นของโรงเพาะเห็ดต้นแบบจากก้อนเห็ด 1,000 ก้อน ซึ่งได้ควบคุมปัจจัยช่วงเวลาการเปิดดอกพร้อมกันของทั้งสองโรงเรือน อีกทั้งอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมยังส่งผลต่อระยะเวลาการเดินเชื้อสร้างเส้นใยเห็ดให้เร็วขึ้นเพื่อเตรียมออกดอกในรอบถัดไป ซึ่งจะอยู่ในระยะเวลาประมาณ 3-7 วัน ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตในสัปดาห์ที่ 9-12 เนื่องจากรอบการออกดอกเห็ดเร็วขึ้น อยู่ในช่วงสร้างเส้นใยเห็ดรอบใหม่และช่วงเดือนที่ 3-4 เข้าสู่ช่วงท้ายของการออกดอกเห็ดที่ลดลงชัดเจน

ตารางที่ 5 ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม 2568

| เดือน                                                 | พฤศจิกายน                 | ธันวาคม                  | ลดลงร้อยละ |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------|
| โรงเพาะเห็ดเดิม บรรจุ 5850 ก้อน ผลผลิต (กิโลกรัม)     | 1,104                     | 497                      | 54.98      |
| โรงเพาะเห็ดต้นแบบ บรรจุ 10,000 ก้อน ผลผลิต (กิโลกรัม) | 2,160                     | 1,120                    | 48.15      |
| ผลผลิตเพิ่มขึ้น                                       | 1,056 กก.<br>ร้อยละ 95.65 | 623 กก.<br>ร้อยละ 125.35 |            |

ตารางที่ 6 ประเมินรายได้การจำหน่ายดอกเห็ดสดเดือนพฤศจิกายนและธันวาคม 2568

| โรงเพาะเห็ด                            | รายได้พฤศจิกายน (บาท)<br>(ราคาขายกิโลกรัมละ 50 บาท) | รายได้ธันวาคม (บาท)<br>(ราคาขายกิโลกรัมละ 50 บาท) |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| โรงเพาะเห็ดเดิม บรรจุได้ 5,850 ก้อน    | 55,200                                              | 24,850                                            |
| โรงเพาะเห็ดต้นแบบ บรรจุได้ 10,000 ก้อน | 108,000                                             | 56,000                                            |
| รายได้เพิ่มขึ้น (บาท)                  | 52,800                                              | 31,150                                            |

ตารางที่ 7 ผลประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

| รายการ                                | ปีที่     |          |         |            |            |            |
|---------------------------------------|-----------|----------|---------|------------|------------|------------|
|                                       | 0         | 1        | 2       | 3          | 4          | 5          |
| ค่าใช้จ่าย                            |           |          |         |            |            |            |
| เงินทุน 1 ระบบ                        | 170,000   |          |         |            |            |            |
| O&M (เงินเพื่อ 3%)                    |           | 2,000    | 2,060   | 2,121.80   | 2,185.45   | 2,251.02   |
| ก้อนเชื้อเห็ด (เงินเพื่อ 3%)          |           | 41,500   | 42,745  | 44,027.35  | 45,348.17  | 46,708.62  |
| ผลตอบแทน                              |           |          |         |            |            |            |
| ประหยัดค่าวัสดุค่าช่าง (เงินเพื่อ 3%) |           | 15,000   | 15,450  | 15,913.50  | 16,390.91  | 16,882.63  |
| ประหยัดค่าแรงงานคน (เงินเพื่อ 3%)     |           | 24,000   | 24,720  | 25,461.60  | 26,225.45  | 27,012.21  |
| จำหน่ายเห็ดสด (เงินเพื่อ 3%)          |           | 107,300  | 110,519 | 113,834.57 | 117,249.61 | 120,767.10 |
| มูลค่าการไหลเงินสด                    | - 170,000 | 102,800  | 105,884 | 109,061    | 112,332    | 115,702    |
| ผลตอบแทนสุทธิสะสม                     | - 170,000 | - 67,200 | 38,684  | 147,745    | 260,077    | 375,779    |
| NPV (บาท)                             |           |          |         | 241,467.29 |            |            |
| IRR (%)                               |           |          |         | 53.74 %    |            |            |
| ระยะเวลาคืนทุน                        |           |          |         | 1.63 ปี    |            |            |

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ตารางที่ 7 ในการลงทุนโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบ พบว่าผลผลิตดอกเห็ดคือปัจจัยหลักในการสร้างรายได้ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน คำนวณหารายได้ที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณผลผลิตดอกเห็ดที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 5 โดย คำนวณระยะเวลาการให้ผลผลิตอยู่ที่ 4 เดือน ในเดือนที่ 3 และ 4 คำนวณผลผลิตในอัตราลดลงร้อยละ 50 และคิดรอบการเพาะเห็ด 1 ครั้ง/ปี ได้ปริมาณผลผลิตรวมเท่ากับ  $1,056 + 623 + 311.5 + 155.75 = 2,146$  กิโลกรัม คิดราคา กิโลกรัมละ 50 บาท เป็นรายได้ที่เพิ่มขึ้นคือ 107,300 บาท ต้นทุนก้อนเห็ดที่เพิ่มขึ้นจำนวน 4,150 ก้อน ราคาก้อนละ 5 บาท คิดเป็นต้นทุนเท่ากับ 20,750 บาท ค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุ ค่าช่างในการปรับปรุงโครงสร้างไม้ที่มีการผุพังทุกปีอยู่ที่ 15,000 บาท/ปี และค่าบำรุงรักษาระบบ 2,000 บาท/ปี

## อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าก่อนเห็ดจะให้ผลผลิตดอกเห็ดสูงสุดในช่วงสัปดาห์ที่ 1-2 และผลผลิตมากสุดในช่วง 1-2 เดือนแรก และผลผลิตดอกเห็ดจะลดต่ำลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ด [3] และการควบคุมความชื้นอัตโนมัติในโรงเพาะเห็ด [8] ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดสัปดาห์ที่ 1 ถึง 12 ของก่อนเห็ด 1,000 ก่อนโรงเพาะเห็ดต้นแบบสามารถเพิ่มผลผลิตเฉลี่ยได้สูงขึ้นประมาณร้อยละ 20.7 มีค่าเฉลี่ยผลผลิตสูงกว่าโรงเพาะเห็ดเดิม โดยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $< 0.05$  ( $p < 0.011$ ) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเพาะเห็ดให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ด ช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพดอกเห็ดได้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [3, 4, 8-10, 12] และให้ผลผลิตดอกเห็ดอย่างสม่ำเสมอ [2] การเกิดดอกในแต่ละรอบเร็วขึ้นคือการเดินเชื้อสร้างเส้นใยเห็ดเร็วขึ้น [7] และยังส่งผลต่อผลผลิตที่สามารถเก็บได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นอีกด้วย [9] โดยความเข้มแสงที่เหมาะสมเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นการออกดอกเห็ด [5, 13] การนำเทคโนโลยีไอโอทีมาประยุกต์ใช้ช่วยให้เกษตรกรสามารถตรวจสอบและควบคุมสภาพแวดล้อมได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการแปรปรวนของสภาพอากาศ [14] ในการขยายผลใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับ ก่อนเห็ด 10,000 ก่อน ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดที่ได้มีปัจจัยที่ไม่ควบคุมคือช่วงระยะเวลาการเปิดดอกที่ไม่พร้อมกันเนื่องจากข้อจำกัดด้านแรงงานคนในการทำก่อนเห็ด งานวิจัยในระยะต่อไปอาจมีการติดตั้งระบบตรวจสอบด้วยภาพเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของเห็ดในแต่ละระยะแบบอัตโนมัติ [15]

## สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโรงเรือนเพาะเห็ดต้นแบบด้วยเทคโนโลยีไอโอที สามารถควบคุมระบบได้แบบอัตโนมัติ ประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้วิธีการพ่นหมอกแทนการใช้สายยางฉีดน้ำ ปรับปรุงความเข้มแสงด้วยหลอดไฟ ซึ่งช่วยกระตุ้นการออกดอก ติดตามและแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในโรงเพาะเห็ด ผ่านสมาร์ตโฟนด้วยแอปพลิเคชัน Blynk จากผลการประเมินประสิทธิภาพระบบการทำงาน สามารถรักษาอุณหภูมิสูงสุดไม่ให้เกิน 32 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 70-87 โดยหลังปรับปรุงระบบแสงสว่างความเข้มแสงมีค่า 96 ลักซ์ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเพาะเห็ดให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ด ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตดอกเห็ดจากโรงเพาะเห็ดต้นแบบสามารถเพิ่มผลผลิตเฉลี่ยได้สูงขึ้นประมาณร้อยละ 20.7 มีค่าเฉลี่ยผลผลิตสูงกว่าโรงเพาะเห็ดเดิม โดยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ  $< 0.05$  ( $p < 0.011$ ) ผลผลิตดอกเห็ดมีคุณภาพดี ให้ผลผลิตดอกเห็ดสม่ำเสมอ และผลจากการปรับปรุงโครงสร้างคานรับน้ำหนักก่อนเห็ดแบบแขวนแนวตั้ง ทำให้ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดบรรจุก่อนเห็ดได้เพิ่มขึ้น 4,150 ก่อน ปริมาณผลผลิตดอกเห็ด 2 เดือน เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 110.5 คิดเป็นรายได้จากการจำหน่ายดอกเห็ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเดือนละ 41,975 บาท ผลประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า งบลงทุนปีแรกเท่ากับ 170,000 บาท ระยะเวลา 5 ปี ผลตอบแทนการลงทุนมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 55.74 % ผลตอบแทนสุทธิ (NPV) เท่ากับ 241,467.29 บาท และมีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 1.63 ปี การนำเทคโนโลยีไอโอทีมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนเพาะเห็ด เป็นการนำเทคโนโลยีใหม่ ยกระดับมาตรฐานการผลิต เพิ่ม

ประสิทธิภาพผลผลิตและขีดความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกร ช่วยลดภาระงาน และเพิ่มความแม่นยำในการบริหารจัดการในรูปแบบของเกษตรสมัยใหม่และนำไปสู่การเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในชุมชนท้องถิ่นได้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการเกษตร. (2558). การเพาะเห็ดเบ๊ ฮ่องตัน. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <http://www.servicelink.doae.go.th/corner%20book/book%2005/Mushroom.pdf> (5 พฤษภาคม 2566).
- [2] วีรศักดิ์ ฟองเงิน, สุรพงษ์ เพ็ชรหาญ และรัฐสิทธิ์ ยะจ่อ. (2561). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 5(1), 172–182.
- [3] กายรัฐ เจริญราษฎร์, อาทิตย์ พวงสมบัติ, ชวโรจน์ ใจสิน และณัฐชามญช์ ศรีจำเริญรัตน. (2562). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ด โดยอาศัยเซนเซอร์ตรวจวัดอากาศร่วมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์. Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, 6(1), 1–12.
- [4] ศิวัตม์ กมลคุณานนท์, นัฐพงศ์ ส่งเนียม, ดุชนิ ศุภวรรธนะกุล และธนภูมิ ศิริงาม. (2565). การศึกษาปัจจัยการผลิตที่ตกกลุ่มเย็นในฟาร์มอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (หน้า 583–591). ใน การประชุมทางวิชาการระดับชาติราชภัฏเลยวิชาการ ครั้งที่ 8.
- [5] อีรพงศ์ เพ็ญเนตร, คมทอง โยวะผุย, ชุติศักดิ์ จาระงับ, ภาณุพงศ์ บุญรัมย์, อุดมเดช ทาระหอม และปิยนุช วรบุตร. (2566). การพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมโรงเรือนเพาะปลูกเห็ดนางรมภูฐานโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวไอโอที. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน, 4(1), 43–56.
- [6] นิตติคม อริยพิมพ์ และชัยพร อัดโดดตร. (2563). การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College, 7(2), 59–72.
- [7] อมรรัตน์ คำบุญ, ณัฐดนัย สิงห์คสิวรรณ, กัลยา ธนาสินธ์ และสายัน พุทธลา. (2564). การพัฒนาตู้เพาะเห็ดอัจฉริยะด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 16(1), 27–40.
- [8] ไกรสร รวยป้อม และร้อยทิศ ญาติเจริญ. (2565). การประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในการควบคุมความชื้นอัตโนมัติในโรงเรือนเพาะเห็ด. วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 8(1), 58–68.

- [9] ธรัช อารีราษฎร์ และวราภา อารีราษฎร์. (2563). ระบบไอโอทีสำหรับการตรวจสอบความชื้นและอุณหภูมิเพื่อส่งเสริมการเพาะเลี้ยงเห็ดในโรงเรือนให้มีผลผลิตที่สมบูรณ์. วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 6(1), 7–17.
- [10] กสมล ชนะสุข, กนกพัชร กอประเสริฐ, ศานติ ดิฐสถาพรเจริญ และสมพล สุขเจริญพงษ์. (2561). การวิเคราะห์ความสูญเสียของระบบการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเห็ดนางฟ้าในจังหวัดนครปฐม. วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 5(2), 130–145.
- [11] อูราภรณ์ สอาดสุด และคณะ. (2552). การควบคุมคุณภาพและยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยวเห็ดสกุลนางรม. รายงานการวิจัย. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [12] Rukhiran, M., Sutanthavibul, C., Boonsong, S., & Netinant, P. (2023). IoT-based mushroom cultivation system with solar renewable energy integration: assessing the sustainable impact of the yield and quality. Sustainability, 15(18), 13968.
- [13] ศิวัตม์ กมลคุณานนท์, เอกฤทัย ฉัตรชัยเดช, สุทธิดา วิทาลัย, เกวลี รั้งชีสุทธาภรณ์, กิตติ เมืองดุ่ม และปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ. (2568). นวัตกรรมการผลิตเห็ดนางฟ้าแบบควบคุมปัจจัยการผลิตในโรงเรือนชุมชนผู้ผลิตเห็ด จังหวัดอุดรดิตถ์. วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่, 17(1), 1–17.
- [14] Rahman, H., Faruq, M. O., Hai, T. B. A., Rahman, W., Hossain, M. M., Hasan, M., Islam, S., Moinuddin, M., Islam, M. T., & Azad, M. M. (2022). IoT enabled mushroom farm automation with Machine Learning to classify toxic mushrooms in Bangladesh. Journal of agriculture and food research, 7, 100267.
- [15] Nguyen, H. H., Shin, D.-Y., Jun, W.-S., Kim, T.-Y., & Lee, D.-H. (2024). An integrated IoT sensor-camera system toward leveraging edge computing for smart greenhouse mushroom cultivation. Agriculture, 14(3), 489.

## กระบวนการเตรียมต้นฉบับ วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต

วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต มีวัตถุประสงค์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (research article) ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทางด้านวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ ประกอบด้วย ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ และทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ประกอบด้วย วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ทางทะเล วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้ แนวคิด ที่เกี่ยวข้องกับการผลงานวิจัย จัดพิมพ์ออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม) ดำเนินการเผยแพร่ในรูปแบบวารสารออนไลน์เท่านั้น โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งบทความต้นฉบับได้ตลอดทั้งปี
2. กองบรรณาธิการตรวจสอบความสมบูรณ์ ความถูกต้อง และคุณภาพของบทความต้นฉบับ
3. กองบรรณาธิการเตรียมต้นฉบับจัดส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินบทความ
4. กองบรรณาธิการส่งต้นฉบับที่ปรับแก้ไขแล้วพร้อมสรุปผลการประเมินคุณภาพต้นฉบับ
5. ผู้เขียนปรับแก้ไขและชี้แจงการปรับแก้ไขกลับมายังกองบรรณาธิการ
6. กองบรรณาธิการตรวจสอบการปรับแก้ไข ความถูกต้อง และรูปแบบการเขียนต้นฉบับ
7. กองบรรณาธิการออกหนังสือตอบรับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ต้นฉบับดังกล่าว ผ่านทางเว็บไซต์
8. กองบรรณาธิการ ดำเนินการรวบรวมต้นฉบับที่จะตีพิมพ์ และส่งต้นฉบับให้ผู้เขียนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเป็นรอบสุดท้าย
9. กองบรรณาธิการดำเนินการเผยแพร่วารสารวิชาการชาชนไทย มรภ. ภูเก็ต

### ข้อตกลงการส่งบทความสำหรับผู้แต่ง

1. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารใดวารสารหนึ่งมาก่อน
2. ผู้เขียนต้องเขียนต้นฉบับตามรูปแบบของวารสารวิชาการ ชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต
3. ต้นฉบับที่ผู้เขียนส่งมาเพื่อการพิจารณาต้องไม่อยู่ระหว่างเสนอขอตีพิมพ์ในวารสารอื่น
4. เนื้อหาในต้นฉบับควรเกิดจากการสังเคราะห์ความคิดขึ้นโดยผู้เขียนเอง ไม่ได้ลอกหรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่น หรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตหรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
5. กรณีที่มีการวิจัยในสัตว์หรือในมนุษย์ ต้นฉบับที่จะได้รับการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ต้องแสดงข้อมูลการรับรองการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์หรือการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ไว้ในส่วนของวิธีดำเนินการวิจัย
6. ผลการประเมินต้นฉบับ มี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ระดับการแก้ไข แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ไม่มีการแก้ไข แก้ไขน้อย แก้ไขปานกลาง และแก้ไขมาก ส่วนที่ 2 ผลการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิต่อการตีพิมพ์เผยแพร่ แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีการแก้ไข แก้ไขก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ เขียนใหม่ก่อนตีพิมพ์เผยแพร่ และไม่ควรตีพิมพ์เผยแพร่ ในการพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ ชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต จะพิจารณาผลจากการประเมินในส่วนที่ 2 ซึ่งต้นฉบับนั้นต้องได้รับผลการประเมินตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่มีการแก้ไข หรือแก้ไขก่อนตีพิมพ์เผยแพร่เท่านั้น จึงจะได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ (accepted)
7. เมื่อได้รับผลการอ่านประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนต้องปรับแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) และชี้แจงการแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวมายังกองบรรณาธิการ หลังจากผู้เขียนได้แก้ไขต้นฉบับแล้ว กองบรรณาธิการจะทำการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง
8. กองบรรณาธิการจะส่งร่างต้นฉบับเพื่อให้ผู้เขียนตรวจสอบความถูกต้องก่อนตีพิมพ์เผยแพร่
9. วารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต ปรับค่าธรรมเนียมการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต สำหรับบทความที่ส่งเข้าสู่ระบบตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2568 เป็นต้นไป จากเดิม บทความละ 5,000 บาท โดยแบ่งจ่ายเป็น 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 จำนวน 3,500 บาท ชำระเมื่อได้รับการพิจารณาเชิงคุณภาพเบื้องต้นโดยกองบรรณาธิการแล้ว และครั้งที่ 2 จำนวน 1,500 บาท

ชำระเมื่อผ่านกระบวนการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและเห็นชอบให้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต เป็น 3,500 บาท โดยชำระค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์ 2 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 ชำระค่าธรรมเนียม จำนวน 2,500 บาท เมื่อได้รับการพิจารณาเชิงคุณภาพเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ และครั้งที่ 2 ชำระค่าธรรมเนียม จำนวน 1,000 บาท เมื่อผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการเห็นชอบให้ตีพิมพ์ในวารสาร (หมายเหตุ ในกรณีที่บทความของผู้นิพนธ์ไม่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิหรือจากการตัดสินใจของบรรณาธิการหรือกรณีอื่นใด หรือเกิดจากบทความบกพร่องของผู้นิพนธ์ ทางวารสารฯ ขอสงวนสิทธิ์ไม่คืนค่าธรรมเนียม)

10. จำนวนหน้า บทความต้นฉบับมีความยาวอยู่ระหว่าง 10–12 หน้า รวมตารางรูปภาพ และเอกสารอ้างอิง

### คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

กองบรรณาธิการได้กำหนดระเบียบในการจัดทำเพื่อให้ผู้เขียนยึดเป็นแนวทางในการดำเนินการสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนนเทศ มรภ.ภูเก็ต ดังนี้

1. การตั้งค่าน้ำกระดาษของบทความต้นฉบับ ใช้ขนาด B5 โดยระยะห่างของขอบกระดาษ 1 นิ้ว ทั้ง 4 ด้าน
2. ต้นฉบับจัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ เนื้อหาหลักใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดชิดขอบกระดาษทั้งสองด้าน
3. เนื้อหาเป็นภาษาไทยเท่านั้น ควรแปลคำศัพท์ภาษาอังกฤษเป็นภาษาไทยให้มากที่สุด ในกรณีที่คำศัพท์ภาษาอังกฤษเป็นคำเฉพาะที่แปลไม่ได้หรือแปลแล้วไม่ได้ความหมายชัดเจนให้ใช้คำศัพท์ภาษาอังกฤษได้ และควรใช้ภาษาที่ผู้อ่านเข้าใจง่ายชัดเจน
4. หัวข้อหลัก ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย
5. หัวข้อย่อย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ระบุหมายเลขหน้าหัวข้อย่อยโดยเรียงตามลำดับหมายเลขตำแหน่ง ให้ Tab 1 เซนติเมตร จากอักษรตัวแรกของหัวข้อหลัก
6. หากใช้คำย่อต้องเขียนคำเต็มไว้ครั้งแรกก่อน
7. ท้ายกระดาษ ประกอบด้วย เลขหน้า ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านขวาล่าง

8. รูปภาพและตารางควรวางใกล้กับตำแหน่งที่ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรก โดยขนาดของรูปภาพควรมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 pixel (บันทึกเป็น .png, .jpeg, .tiff) และแนบไฟล์ต้นฉบับของรูปแยกมาด้วย

### การเรียงลำดับเนื้อหาและรายละเอียดส่วนต่าง ๆ ในต้นฉบับ

1. ชื่อเรื่องภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 16 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด (ไม่ควรเกิน 100 ตัวอักษร)
2. ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 16 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด โดยขึ้นต้นทุกคำด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่เว้นคำบุพบท
3. ชื่อผู้แต่ง ต้องเขียนทั้งภาษาไทยและอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งกึ่งกลางหน้ากระดาษ ได้ชื่อเรื่อง ให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (\*) กำหนดเป็นตัวยก กำกับท้ายนามสกุล ของผู้ประสานงานหลัก
4. หน่วยงานหรือสังกัดที่ทำวิจัย ต้องเขียนทั้งภาษาไทยและอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวเอียง ตำแหน่ง กึ่งกลางหน้ากระดาษได้ชื่อผู้เขียน ให้ใส่ตัวเลชยกกำกับท้ายนามสกุล และ ด้านหน้าหน่วยงานหรือสังกัด
5. เจริญพร กำหนดเจริญพรในหน้าแรกของบทความ ให้ใส่เครื่องหมายดอกจันตามด้วยข้อความ ดังนี้ \*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author) โดยใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา และระบุ E-mail: โดยใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวเอียง
6. หัวข้อบทคัดย่อภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้ายใต้ที่อยู่/หน่วยงานสังกัดของผู้เขียน เนื้อหาบทคัดย่อไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ บรรทัดแรกเว้น Tab 1 เซนติเมตร จากขอบกระดาษด้านซ้าย และพิมพ์ให้ชิดขอบทั้งสองด้าน (ควรเขียนสรุปสาระสำคัญ ความยาวไม่เกิน 250 คำ หรือ 15 บรรทัด)
7. หัวข้อคำสำคัญภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย ใต้บทคัดย่อภาษาไทย ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ไม่เกิน 4 คำ เว้นระหว่างคำด้วยการเคาะ 1 ครั้ง

8. หัวข้อบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้ายใต้ที่อยู่/หน่วยงานสังกัดของผู้เขียน เนื้อหาบทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ บรรทัดแรกเว้น Tab 1 เซนติเมตร จากขอบกระดาษด้านซ้าย และพิมพ์ให้ชิดขอบทั้งสองด้าน (ควรเขียนสรุปสาระสำคัญ ความยาวไม่เกิน 250 คำ หรือ 15 บรรทัด)
9. หัวข้อคำสำคัญภาษาอังกฤษ (Keyword) ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวหนา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ใช้รูปแบบอักษร TH SarabunPSK ขนาด 14 ชนิดตัวธรรมดา ไม่เกิน 4 คำ เว้นระหว่างคำด้วย Comma “,”
10. บทนำ บอกถึงที่มา นำไปสู่การศึกษาวิจัย รวมถึงการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
11. วัตถุประสงค์ ชี้แจงจุดมุ่งหมายของงานวิจัย
12. วิธีดำเนินการวิจัย ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล
13. ผลการวิจัย ควรนำเสนอสิ่งที่ได้จากการศึกษา ในรูปแบบตาราง กราฟ หรือแผนภาพ ทั้งนี้ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้าย และขวา หัวตารางแบบธรรมดาไม่มีสี ไม่ควรมีเกิน 5 ตาราง สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพที่ชัดเจน (ความละเอียดอย่างน้อย 300 pixel) และมีคำบรรยายใต้รูป (ดัง Template) กรณีที่ผู้เขียนต้นฉบับประสงค์จะใช้ภาพสี จะต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายดังกล่าว
14. อภิปรายผลการวิจัย ควรมีการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
15. สรุปผลการวิจัย ควรให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์และระเบียบวิธีการวิจัย
16. กิตติกรรมประกาศ ควรกล่าวถึงแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยอย่างกระชับ
17. เอกสารอ้างอิง ชิดขอบซ้าย เนื้อหาทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษใช้ TH SarabunPSK ขนาด 14 pt ชนิดตัวธรรมดา ตำแหน่งชื่อผู้เขียนชิดขอบซ้าย หากยาวเกิน 1 บรรทัด ให้ตัวอักษรในบรรทัดถัดไปตรงกับตัวอักษรแรกของชื่อในบรรทัดแรก การอ้างอิงเอกสารให้เขียนตามรูปแบบที่วารสารกำหนด ดังนี้

- 17.1 การอ้างอิงแทรกในเนื้อหา ให้ใส่เลขลำดับการอ้างอิงอยู่ในวงเล็บ [...] เช่น แผ่นเปลือกโลกมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและแบ่งการเคลื่อนที่ของแผ่นโลกออกเป็น 3 แบบ คือ การชนกัน การแยกจากกัน และแบบรอยเลื่อน [1]
- 17.2 การเขียนรายการอ้างอิงท้ายบทความให้เรียงลำดับรายการตามการอ้างอิงในบทความ ไม่ใช่ตามตัวอักษรของรายการที่อ้างอิง
- 17.3 ลงชื่อผู้แต่งทุกคน โดยคั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) ระหว่างผู้แต่งแต่ละคน และให้ใช้คำว่า “และ” นำหน้าผู้แต่งคนสุดท้ายในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย หรือใช้ “&” นำหน้าผู้แต่งคนสุดท้ายในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษ กรณีชื่อผู้แต่งชาวไทย: ชื่อและนามสกุลเต็ม กรณีชื่อผู้แต่งชาวต่างประเทศ: นามสกุล, ตัวอักษรย่อของชื่อต้นและชื่อกลาง
- 17.4 ปีที่พิมพ์อยู่ในเครื่องหมายวงเล็บ (...) หากอยู่ในระหว่างการพิมพ์ ให้ใช้ “(อยู่ระหว่างการพิมพ์)” ในกรณีเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย หรือใช้ “(in press)” ในกรณีเอกสารอ้างอิงนั้นเป็นภาษาอังกฤษ
- 17.5 ชื่อเรื่องที่เป็นภาษาอังกฤษให้ขึ้นต้นด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะคำแรก อักษรตัวแรกของชื่อเรื่องย่อยและ/หรือชื่อเฉพาะ (ถ้ามี) ใช้อักษรตัวเอียงในการพิมพ์

### ตัวอย่างการอ้างอิง

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทความในวารสารวิชาการ (research/review article)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, ปีที่(ฉบับที่), เลขหน้าที่ปรากฏบทความในวารสาร.

[1] นรภัทร น้อยหลบลู และชวิศร ปุคะภาค. (2559). การพัฒนากังหันเติมอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 35(2), 141–149.

[2] Lu, Y., & Larock, R. C. (2011). Synthesis and properties of grafted latices from a soybean oil-based waterborne polyurethane and aryls. Journal of Applied Polymer Science, 119(6), 3305–3314.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น หนังสือ (book)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง (ครั้งที่พิมพ์). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.

[3] บพิธ จารุพันธุ์, และนันทพร จารุพันธุ์. (2558). สัตววิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 7). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[4] Hickman, C. P. Jr., Roberts, L. S., Keen, S. L., Eisenhour, D. J., Larson, A., & l'Anson, H. (2014). Integrated principles of zoology (6th edition). McGraw-Hill.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทในหนังสือ (Book chapter)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบท. ใน ชื่อบรรณาธิการ (บ.ก.). ชื่อหนังสือ (พิมพ์ครั้งที่., หน้า.). สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.

[5] Agrawal, R., Mannila, H., Srikant, R., Toivonen, H., & Verkamo, A. I. (1996). Fast discovery of association rules. In Fayyad, U. M., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., & Uthurusamy, R. (eds). Advances in knowledge discovery and data mining (pp. 307–328). AAAI Press.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานการวิจัย (research report)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. รายงานผลการวิจัย. ชื่อหน่วยงานหรือสังกัด.

[6] จิตราภรณ์ ภูมิไชย, กฤษดา สังข์สิงห์, และเฉลิมพล ภูมิไชย. (2557). การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมบัติไม้ยางพารา. รายงานการวิจัย. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น วิทยานิพนธ์ (thesis)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท/มหาบัณฑิต หรือ Doctoral/Master's thesis. สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.

[7] พรธณี สอาดฤทธิ์. (2545). ความหลากหลายและการแพร่กระจายของคลาโดเซราในแหล่งน้ำจืด จังหวัดตรัง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (proceedings)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. ใน ชื่องานประชุมวิชาการ (จัดงานครั้งที่). หน้า.

[8] วันวิสาข์ ชิดเชื้อ, และพงษ์รัตน์ ดำรงโรจน์วัฒนา. (2553). อนุกรมวิธานของหอยทากบกในเขตอำเภอแกลง จังหวัดระยอง และอำเภอแก่งหางแมว จังหวัดจันทบุรี. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, 161–170.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น เว็บไซต์ (website)

[...] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. [ออนไลน์], สืบค้นจาก ระบุ URL ของเว็บไซต์ (วัน เดือน ปี ที่สืบค้น)

[9] สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน. (2562). องค์ความรู้เกี่ยวกับแมงกะพรุนพิษในประเทศไทย. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://km.dmcrc.go.th> (6 พฤศจิกายน 2562).

### การส่งต้นฉบับ

ผู้เขียนส่งต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์ในระบบ ThaiJo2.0

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/index>

### การประเมิน และลิขสิทธิ์

1. การอ่านประเมินบทความต้นฉบับ ต้นฉบับจะได้รับการอ่านประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 ท่าน ต่อเรื่อง และส่งผลการประเมินคืนผู้เขียนเพื่อปรับปรุง แก้ไข หรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี ทั้งนี้กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องเป็นบุคคลที่อยู่คนละหน่วยงานกับผู้เขียนไม่น้อยกว่า 2 ใน 3 และผู้ทรงคุณวุฒิทั้งหมดต้องไม่เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อผู้เขียนหรือบทความวิจัยดังกล่าว

2. เนื้อหาต้นฉบับที่ปรากฏในวารสารเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน ทั้งนี้ไม่รวมความผิดพลาดอันเกิดจากเทคนิคการพิมพ์

3. ลิขสิทธิ์ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของวารสารวิชาการชาชนไทย มรภ.ภูเก็ต

ชื่อเรื่องภาษาไทย (TH SarabunPSK, 16 pt, ตัวหนา, ยาวไม่เกิน 2 บรรทัด)

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ขึ้นต้นทุกคำด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ยกเว้นคำบุพพท)

ชื่อ นามสกุล<sup>\*1</sup> ชื่อ นามสกุล<sup>1</sup> และ ชื่อ นามสกุล<sup>2</sup>

Full name<sup>\*1</sup>, Full name<sup>1</sup>, & Full name<sup>2</sup>

(TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา ใช้เครื่องหมาย \* ตัวยก หลังนามสกุลของผู้ประสานงาน)

ที่อยู่หน่วยงานที่สังกัด (TH SarabunPSK, 12 pt, ตัวเอียง)

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

<sup>1</sup>Science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

<sup>2</sup>Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

บทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

เนื้อหาบทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, Tab 1 cm) ความยาวสูงสุดไม่ควรเกิน 250 คำ  
เขียนเพียง 1 ย่อหน้า และไม่มีการเขียนอ้างอิงในส่วนของบทคัดย่อ .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำสำคัญ (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา): (ไม่เกิน 4 คำ) (TH SarabunPSK, 14 pt)

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author) (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

E-mail: (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวเอียง)

E-mail: ..... ผู้วิจัยร่วม ทุกคน ..... (อีเมลของผู้วิจัยร่วมนี้จะไม่ปรากฏในบทความวิจัย แต่ทางวารสารจำเป็นต้องบันทึกอีเมลของนักวิจัยทุกคนในระบบ ThaiJo)

## Abstract (TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา)

เนื้อหาบทคัดย่อ (TH SarabunPSK, 14 pt, Tab 1 cm) ความยาวสูงสุดไม่ควรเกิน 250 คำ เขียนเพียง 1 ย่อหน้า และไม่มีการเขียนอ้างอิงในส่วนของบทคัดย่อ .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Keywords(TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา): (ไม่เกิน 4 คำ) (TH SarabunPSK, 14 pt)

keywords เป็นตัวพิมพ์เล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อบุคคล ชื่อสถานที่ และคำศัพท์เฉพาะ (technical term)

## ข้อแนะนำ

1. บทความวิจัยควรมีความยาวไม่เกิน 10-12 หน้า กระดาษ B5
2. ลักษณะการเขียนเป็นรูปแบบ 1 คอลัมน์
3. หัวข้อใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวหนา
4. เนื้อหาใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK, 14 pt, ตัวปกติ
5. Line and Paragraph Spacing ให้ใช้ 1.0
6. การอ้างอิงให้ใช้ระบบตัวเลขอยู่ภายใน [...] และจะต้องเรียงลำดับเช่นนี้ในส่วนของเอกสารอ้างอิงท้ายบทความ

โดยมีรายละเอียดหัวข้อ ดังนี้

## บทนำ (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

บทนำสามารถเขียนได้มากกว่า 1 ย่อหน้า โดยอธิบายถึงที่มา ปัญหาวิจัย คำถามวิจัย และการทบทวนวรรณกรรม (literature review) โดยไม่ต้องแยกเป็นหัวข้อย่อย

การอ้างอิงในเนื้อหา ใช้ระบบตัวเลขอยู่ภายใน [...] (TH SarabunPSK, 14 pt) เช่น [1] หรือ [1, 2, 4] หรือ [1-3] โดยตัวเลขจะเป็นลำดับของการอ้างอิง และจะต้องเรียงลำดับเช่นนี้ในส่วนของเอกสารอ้างอิงท้ายบทความ

วัตถุประสงค์ (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

1. ....(TH SarabunPSK, 14 pt)
2. ....(TH SarabunPSK, 14 pt)

วิธีดำเนินการวิจัย (TH SarabunPSK, 14 pt ตัวหนา)

**หัวข้อย่อย**

ถ้าผู้เขียนต้องการเขียนหัวข้อย่อย ให้ทำตัวหนา แต่ต้องไม่ขีดขอบเป็นแนวเดียวกับหัวข้อหลัก  
รูปภาพควรวางใกล้กับตำแหน่งที่ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรก ขนาดของรูปภาพควรมีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi (โดยบันทึกเป็น .png .gif หรือ .tif)

.....  
.....  
.....

**หัวข้อย่อย**

.....  
.....  
..... (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ภาพควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก

ผลการวิจัย

**หัวข้อย่อย**

.....  
.....  
..... (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 .....

| No. | Heading 1 | Heading 2 | Heading 3 |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1   | Data 1.1  | Data 1.2  | Data 1.3  |
| 2   | Data 2.1  | Data 2.2  | Data 2.3  |
| 3   | Data 3.1  | Data 3.2  | Data 3.3  |
| 4   | Data 4.1  | Data 4.2  | Data 4.3  |

ข้อแนะนำ

1. ตารางควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก
2. ตารางควรจัดตัวอักษรให้อยู่ตรงกลาง
3. เส้นตารางใช้เฉพาะแนวนอน

หัวข้อย่อย

.....  
.....  
..... (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ภาพควรวางใกล้ตำแหน่งที่มีการกล่าวถึงเป็นครั้งแรก

อภิปรายผลการวิจัย

อภิปรายผลการวิจัยสามารถเขียนได้มากกว่า 1 ย่อหน้า และสามารถมีหัวข้อย่อยได้ โดยอธิบายว่าทำไมจึงได้ผลการวิจัยเป็นเช่นนั้น สอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้หรือไม่อย่างไร อธิบายถึงประโยชน์ การประยุกต์ใช้ ปัญหาและอุปสรรค หรือโจทย์วิจัยที่จะต่อยอดจากงานวิจัยครั้งนี้ เป็นต้น

## สรุปผลการวิจัย

.....  
.....  
.....

## กิตติกรรมประกาศ

.....  
.....  
.....

## เอกสารอ้างอิง เรียงลำดับตามการกล่าวถึงในบทความ

### ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทความในวารสารวิชาการ (research/review article)

- [1] นรภัทร น้อยหลบลู, และชวิศร ปุคะภาค. (2559). การพัฒนากังหันเดิมอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 35(2), 141-149.
- [2] Lu, Y., & Larock, R. C. (2011). Synthesis and properties of grafted latices from a soybean oil-based waterborne polyurethane and aryls. Journal of Applied Polymer Science, 119(6), 3305-3314.

### ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น หนังสือ (Book)

- [3] บพิธ จารุพันธุ์, และนันทพร จารุพันธุ์. (2558). สัตววิทยา (พิมพ์ครั้งที่ 7). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] Hickman, C. P. Jr., Roberts, L. S., Keen, S. L., Eisenhour, D. J., Larson, A., & l'Anson, H. (2014). Integrated principles of zoology (6<sup>th</sup> edition). McGraw-Hill.

### ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น บทในหนังสือ (Book chapter)

- [5] Agrawal, R., Mannila, H., Srikant, R., Toivonen, H., & Verkamo, A. I. (1996). Fast discovery of association rules. In Fayyad, U. M., Piatetsky-Shapiro, G., Smyth, P., & Uthurusamy, R. (eds). Advances in knowledge discovery and data mining (pp. 307–328). AAAI Press.

### ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานการวิจัย (research report)

- [6] จิตาภรณ์ ภูมิไชย์, กฤษดา สังข์สิงห์, และเฉลิมพล ภูมิไชย์. (2557). การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมบัติไม้ยางพารา. รายงานการวิจัย. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น วิทยานิพนธ์ (thesis)

- [7] พรรณี สอาดฤทธิ์. (2545). ความหลากหลายและการแพร่กระจายของคลาโดเซอราในแหล่งน้ำจืด จังหวัดตรัง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ (proceedings)

- [8] วันวิสาข์ ชิดเชื้อ, และพงษ์รัตน์ ดำรงโรจน์วัฒนา. (2553). อนุกรมวิธานของหอยทากบกในเขต อำเภอกาหลง จังหวัดระยอง และอำเภอกง่างาม จังหวัดจันทบุรี. ใน การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, 161-170.

ตัวอย่างเอกสารอ้างอิงที่เป็น เว็บไซต์ (website)

- [9] สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน. (2562). องค์ความรู้ เกี่ยวกับแมงกะพรุนพิษในประเทศไทย. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://km.dmcr.go.th> (6 พฤศจิกายน 2562).

วารสารวิชาการชาชนิเทศ มรภ.ภูเก็ต  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต  
21 ม. 6 ถ.เทพกระษัตรี ต.รัษฎา อ.เมือง จ.ภูเก็ต 83000  
โทรศัพท์ : 076 - 523094 - 7 ต่อ 4000  
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/index>  
E-mail : researchscience@pkru.ac.th

