



ISSN 3088-1196 (online)

PRAWARUN

Vol. 23 No. 1 (January-June 2026)

PRAWARUN

AGRICULTURAL JOURNAL

Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Thailand

วารสาร เกษตรพระวรุณ

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2569)



วารสารเกษตรพระวรุณ

PRAWARUN AGRICULTURAL JOURNAL

ISSN 3088-1196 (ONLINE)

วัตถุประสงค์	1. เพื่อเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และผู้สนใจในสาขาเทคโนโลยีการเกษตร ในมหาวิทยาลัย วิทยาลัย และองค์กรทางการเกษตรทั้งภาครัฐและเอกชน 2. เป็นเวทีทางวิชาการเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้และวิทยาการทางด้านการเกษตรระหว่างนักวิชาการ ผู้ประกอบการ และผู้รู้อื่น ๆ 3. เพื่อเป็นเอกสารทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนในสาขาเทคโนโลยีการเกษตร และการพัฒนาอาชีพเกษตรให้แก่เกษตรกรและผู้สนใจ		
นโยบายและขอบเขตการตีพิมพ์	1. เป็นบทความวิจัย (Research Article) บทความปริทัศน์ (Review Article) หรือบทความวิชาการ (Academic Article) ทางด้านเกษตรศาสตร์และสาขาเทคโนโลยีการเกษตรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พืชศาสตร์ สัตวศาสตร์ ประมง วิทยาศาสตร์สุขภาพสัตว์ วิทยาศาสตร์การอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร ธุรกิจการเกษตร ส่งเสริมการเกษตร สารสนเทศการเกษตร นวัตกรรมเกษตร และนวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นต้น 2. ต้องไม่เคยได้รับตีพิมพ์มาก่อน (ต้นฉบับ หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของต้นฉบับ) และต้นฉบับต้องไม่ได้อยู่ระหว่างกระบวนการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งตีพิมพ์อื่นใด		
ข้อกำหนดเฉพาะของวารสาร	1. บทความที่ลงตีพิมพ์ทุกเรื่องได้รับการตรวจสอบทางวิชาการโดยผู้ประเมินอิสระ (Peer Reviewer) อย่างน้อยบทความละ 3 ท่าน แบบ Double blind 2. กองบรรณาธิการวารสารเกษตรพระวรุณ ไม่สงวนสิทธิ์การคัดลอกแต่ให้อ้างอิง แสดงที่มา		
เจ้าของ	คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม		
ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรชนก จันท์สว่าง อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อาจารย์ ดร.นพดล สมผล คณบดีคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม		
บรรณาธิการหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ แก่นจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (ประมง) คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม		

คณะกรรมการกองบรรณาธิการ

1. กองบรรณาธิการบุคคลภายนอกมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่อยู่นอกมหาวิทยาลัยต่างประเทศ
 - 1.1 Professor Dr. Clemen Fuchs University of Applied Sciences, Neubrandenburg, Germany
 - 1.2 Associate Professor Dr. J.T. Thomas Faculty of Veterinary Medicine, Department of Farm Animal Health, Utrecht University the Netherlands
2. กองบรรณาธิการบุคคลภายนอกมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่อยู่นอกมหาวิทยาลัยในประเทศไทย
 - 2.1 ศาสตราจารย์ ดร.ฉลอง วชิราภากร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 - 2.2 ศาสตราจารย์ ดร.เกษม สร้อยทอง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 - 2.3 รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชคตระการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
 - 2.4 รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ตรีโลเกศ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 - 2.5 รองศาสตราจารย์ ดร.โอภาส พิมพา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
 - 2.6 รองศาสตราจารย์ ดร.นนทวิทย์ อารีชัยน คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 - 2.7 รองศาสตราจารย์ ดร.ไกรเลิศ ทวีกุล คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 - 2.8 รองศาสตราจารย์ น.สพ. ดร. อุดมพร รุ่งสิทธิชัย คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 - 2.9 รองศาสตราจารย์ ดร.รัชณี นามมาตย์ สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 - 2.10 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมพล เยื้องกลาง คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนครราชสีมา
 - 2.11 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ เชาว์เครือ คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี
 - 2.12 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เขียวสุวรรณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 - 2.13 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนกานต์ อินทรกำแหง คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
 - 2.14 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ ชุสุข คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 - 2.15 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.สมักร สุจริต คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตร
3. กองบรรณาธิการบุคคลภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
 - 3.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูทวีป ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา สาขาเทคโนโลยีการอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร
 - 3.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตติยา ด้านโอภาส สาขาสัตวศาสตร์
 - 3.3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ แก่นจันทร์ สาขาประมง
 - 3.4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีทรัพย์ ไชยรักษ์ สาขาพืชศาสตร์และส่งเสริมการเกษตร
 - 3.5 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุตร จิตจักร สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศการเกษตร
 - 3.6 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรุณ โมนะตระกูล สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกล
 - 3.7 อาจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ไกรจักร แก้วพรม สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพสัตว์
 - 3.8 อาจารย์ ดร.มนันยา นันทสาร สาขาบริหารธุรกิจเกษตรและเศรษฐศาสตร์เกษตร

4. ฝ่ายจัดการงานวารสารเกษตรพระวรุณ

4.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ แก่นจันทร์	ผู้จัดการวารสาร (Journal Manager)
4.2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธชาติ อิ่มใจ	ผู้ออกแบบกราฟิก (Graphic Designer)
4.3 อาจารย์วีระเดช โชนสันเทียะ	ผู้พิสูจน์อักษร (Proofreader)
4.4 อาจารย์ ดร.มนันยา นันทสาร	บรรณาธิการวารสาร
4.5 นางสาวศรัณญา ภูหัวไร่	ผู้ช่วยบรรณาธิการวารสาร
4.6 นายธรรมชาติ แสงนิล	บรรณาธิการฝ่ายผลิต (Production Editor)
4.7 นางสาวชยาภย์ ฤทธาพรหม	บรรณาธิการฝ่ายผลิต (Production Editor)

กำหนดเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน

ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม

เครดิตภาพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธชาติ อิ่มใจ

สำนักงาน

คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

เลขที่ 80 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

โทรศัพท์/โทรสาร

043 - 725439

อีเมล

prawarun.j@rmu.ac.th

เว็บไซต์วารสารเกษตรพระวรุณ

<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>



QR Code วารสารเกษตรพระวรุณ

ข้อความและบทความในวารสารนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยเฉพาะ
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบในเนื้อหาและข้อคิดเห็นนั้นๆ แต่อย่างใด

คำนำ

การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศไทยในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดความก้าวหน้าทางด้านเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตรเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดองค์ความรู้งานวิจัยและนวัตกรรมทางการเกษตรที่เกี่ยวข้องมากมาย เพื่อเป็นการถ่ายทอดองค์ความรู้ทางด้านเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตรทางคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จึงได้จัดทำวารสารวิชาการเพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ในรูปแบบบทความวิจัย (Research Article) บทความวิชาการ (Academic Article) และ บทความปริทัศน์ (Review Article) โดยมีขอบเขตการรับตีพิมพ์บทความด้านเกษตรศาสตร์และสาขาเทคโนโลยีการเกษตรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พืชศาสตร์ สัตวศาสตร์ ประมง วิทยาศาสตร์ทางสุขภาพสัตว์ วิทยาศาสตร์การอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรธุรกิจการเกษตร ส่งเสริมการเกษตร สารสนเทศการเกษตรนวัตกรรมการเกษตร และนวัตกรรมเทคโนโลยีเครื่องจักรกลการเกษตร เป็นต้น โดยกำหนดการเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือนมกราคม – มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

วารสารเกษตรพระวรุณในปี พ.ศ. 2569 ถือเป็นปีที่ 23 โดยวารสารได้รับผลการประเมินคุณภาพวารสารอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในผลประเมินคุณภาพมีระยะเวลาการรับรองคุณภาพวารสารตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2568 ไปจนถึง วันที่ 31 ธันวาคม 2572 ในฐานข้อมูล Thai-Journal Citation Index: TCI ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยตามที่คุณยต์กล่าวประกาศไว้ เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ซึ่งหมายถึงคุณภาพเป็นที่การยอมรับและมีประโยชน์ต่อวงวิชาการด้านเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

สำหรับวารสารปีที่ 23 (Volume 23) ฉบับที่ 1 (Number 1) นี้ประกอบด้วยบทความวิจัย (Research Articles) จำนวน 5 บทความ จากหลากหลายสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยมีกำหนดการเผยแพร่ระหว่างเดือนมกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2569 ผ่านการเผยแพร่ออนไลน์ผ่านระบบ Thai Journal online (ThaiJO) (ISSN 3088-1196)

ทางกองบรรณาธิการเกษตรพระวรุณหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นสื่อกลางในการช่วยเผยแพร่องค์ความรู้ใหม่และงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการเกษตรแก่คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และผู้ที่สนใจให้ได้รับข้อมูลที่มีประโยชน์ในการต่อยอดองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการพัฒนาประเทศให้ก้าวหน้าและยั่งยืนต่อไป

กองบรรณาธิการวารสารเกษตรพระวรุณ
30 มิถุนายน 2569

วารสาร

เกษตรพระวรุณ

PRAWARUN AGRICULTURAL JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569

VOL. 23 NO. 1 January – June 2026

ISSN 3088-1196 (Online)

สารบัญ

บทความวิจัย (Research Article)

- การพัฒนาแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง:
กรณีศึกษาประเทศไทย 1
ณัฐภาณุ บรธา, พูนศักดิ์ ศิริโสม, ปรมารณ แสงภาร, วริดา พลาศรี, อุเทน จินโรจน์ และ รดา สมเชื่อน
Development of a Forecasting Model for PM2.5 Concentrations Using Machine Learning Techniques: A Case Study in Thailand
Nitaya Buntao, Poonsak Sirisom, Paramaporn Sangpara, Warida palasri, Auten Gennaroj and Rada Somkhuean
- ผลของระดับการใส่ส่วนผสมของโปรตีนจากพืชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช 16
จิรนต์ รัตสีโว, จิรายุ มุสิก, สหส พอนิล และ อนูวัฒน์ ศรีสุวรรณ
Effects of tofu inclusion level on the physicochemical properties of plant-based meat analogues
Jiranan Ratsewo, Jirayu Musika, Sahutsa Ponnil and Anuwat Srisuwan
- ผลของความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อการเจริญเติบโตผลผลิต และคุณภาพทางกายภาพของผักสลัด 24
เกียรติ ทองเนตร, เหล็กไหล จันทะบุตร, วุฒิพล ฉัตรจรัสกุล, ธวัชชัย สหพงษ์, กุลริศา คำสิงห์ และ วุฒเมธี วรเสริม
Effect of Photosynthetic Bacteria Concentration on Growth Yield and Physical Quality of Lettuce
Keerati Tongnate, Leklai Chantabut, Vuttipol Chatjaraskul, Thawatchai Sahapong, Kulrisa Khumsing and Wutmetee Woraserm
- การตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและโลหิตวิทยาในปลาทอง (*Carassius auratus*) ด้วยวัคซีนป้องกันเชื้อ *Aeromonas hydrophila* 30
พุทธรชาติ อิมใจ, บัณฑิตา สวัสดิ์, ชนวรรณ ไทวรรณ, เหล็กไหล จันทะบุตร และ อรอนงค์ ชันเดช
Immunological and Hematological Responses of Goldfish (*Carassius auratus*) Following Vaccination Against *Aeromonas hydrophila*
Puttachat Imjai, Banthita Sawasdee, Chanawan Thowanna, Leklai Chantabut and Aonanong Khundech

บทความวิจัย (Research Article)

- การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของข้าวพื้นเมือง (*Oryza sativa* L.) เพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากข้าว 39
ชญญรินทร์ สมพร
Nutrient and Antioxidant Analysis of Indigenous Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties for Adding Value to Rice Products
Chanyarin Somporn



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrnu/index>

บทความวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง: กรณีศึกษาประเทศไทย

ณิฏฐ์ บรเทศ¹ พูนศักดิ์ ศิริโสม¹ ปริมาภรณ์ แสงภรา¹ วริดา พลาศรี¹ อุเทน จินโรจน์³ และ รดา สมเชื่อน^{2*}

¹สาขาวิชาสถิติศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย 44000

²กลุ่มวิชาคณิตศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย 50300

³สำนักงานสาธารณสุขอำเภอเขียงยืน อำเภอเขียงยืน จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย 44160

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 30 กรกฎาคม 2568

แก้ไข: 17 ตุลาคม 2568

ตอบรับการตีพิมพ์: 12 ธันวาคม 2568

ตีพิมพ์ออนไลน์: 30 มกราคม 2569

คำสำคัญ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

การเรียนรู้ของเครื่อง

แบบจำลอง

สิ่งแวดล้อม

การเกษตร

บทคัดย่อ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ สิ่งแวดล้อม และภาคการเกษตรของประเทศไทย โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งที่ระดับฝุ่นมักเกินค่ามาตรฐาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์ (Forecasting Model) ค่าฝุ่น PM2.5 โดยเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลา (Time Series Forecasting Methods) ได้แก่ วิธีโฮลท์-วินเทอร์ส (Holt-Winters) และเออาร์ไอมา (ARIMA) กับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Techniques) ได้แก่ เรนดอมฟอเรสต์ (Random Forest) และซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรสชัน (Support Vector Regression: SVR) ใช้ข้อมูลรายเดือนจากกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2561–2567 โดยแบ่งข้อมูลตามลำดับเวลาเป็นชุดฝึก (Training Set) และชุดทดสอบ (Test Set) ในสัดส่วน 80:20 และประเมินความแม่นยำด้วยตัวชี้วัด รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) ผลการศึกษาพบว่าเรนดอมฟอเรสต์ (Random Forest) ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในทุกพื้นที่ โดยเฉพาะจังหวัดที่มีความผันผวนสูง เช่น เชียงใหม่และขอนแก่น ขณะที่เออาร์ไอมา (SVR) ให้ผลลัพธ์แม่นยำน้อยกว่า แบบจำลองอนุกรมเวลา (Time Series Models) ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีในพื้นที่ที่ข้อมูลมีความต่อเนื่อง เช่น สงขลา โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง ได้แก่ ตัวแปรแบบหน่วงเวลา (Lag Variables) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยเฉพาะเรนดอมฟอเรสต์ (Random Forest) แสดงศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบแจ้งเตือนคุณภาพอากาศ (Air Quality Alert System) และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมและภาคการเกษตรอย่างยั่งยืน

บทนำ

ตลอดช่วงระยะปี พ.ศ.2554 - 2567 ที่ผ่านมา ประเทศไทยต้องเผชิญกับปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า PM2.5 ซึ่งส่งผลกระทบต่อหลายด้าน ทั้งสุขภาพของประชาชน คุณภาพสิ่งแวดล้อม และระบบเศรษฐกิจโดยรวม ฝุ่น PM2.5 มีขนาดเล็กมากจนสามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ลึกถึงถุงลมปอด ทำให้เพิ่มความเสี่ยงต่อโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง มะเร็งปอด และโรคหัวใจขาดเลือด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประชากรเปราะบาง เช่น ผู้สูงอายุ เด็กเล็ก และผู้ป่วยโรคประจำตัว (World Health Organization, 2021) ผลกระทบของ PM2.5 ไม่ได้จำกัดเฉพาะต่อสุขภาพของมนุษย์เท่านั้น แต่ยังแผ่ขยายไปสู่ภาคการเกษตรอย่างชัดเจน หลายงานวิจัยพบว่าฝุ่นละอองสามารถลดประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้พืชเจริญเติบโตช้าลงและส่งผลให้ผลผลิตลดลงในพื้นที่เปิดโล่ง อีกทั้งยังอาจทำให้แรงงานภาคเกษตรมีปัญหาด้านสุขภาพ ส่งผลต่อแรงงานผลิตโดยรวมในระยะ

ยาว สำหรับประเทศไทย แหล่งกำเนิด PM2.5 มีความหลากหลายและขึ้นอยู่กับบริบทของแต่ละพื้นที่ เช่น ในเขตเมืองใหญ่มักเกิดจากการคมนาคมขนส่งและกิจกรรมก่อสร้าง ขณะที่ในเขตชนบท โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปัญหาหลักมักมาจากการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรหลังฤดูเก็บเกี่ยว ไม่ว่าจะเป็นการเผาตอซังข้าว อ้อย หรือซังข้าวโพด แม้ว่ารัฐจะมีนโยบายควบคุมการเผาในที่โล่งและมีการรณรงค์อย่างต่อเนื่อง แต่การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในระดับพื้นที่ยังคงเป็นความท้าทายที่ต้องใช้เวลา จังหวัดเชียงใหม่เป็นตัวอย่างชัดเจนของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเผาในภาคเกษตร โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งระหว่างเดือนมีนาคมถึงเมษายน ซึ่งค่าฝุ่น PM2.5 มักสูงเกินมาตรฐานติดต่อกันนานหลายวัน ส่วนจังหวัดขอนแก่นซึ่งตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือก็มีปัญหาฝุ่นจากกิจกรรมทางการเกษตรผสมกับการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว ด้านกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจของประเทศ ประสบกับฝุ่นจากการจราจรหนาแน่นและมลพิษทางอุตสาหกรรม ขณะที่จังหวัดสงขลาในภาคใต้

*Corresponding author

E-mail address: rada@rmutl.ac.th (R. Somkhuean)

Online print: 30 January 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.1>

ของประเทศไทย แม้จะไม่มีแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศขนาดใหญ่ภายในพื้นที่เมื่อเทียบกับเขตเมืองหรือพื้นที่เกษตรกรรมในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แต่ยังคงพบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) ในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะในฤดูมรสุม ซึ่งมีรายงานการเคลื่อนย้ายของควันไฟป่าข้ามพรมแดนจากประเทศเพื่อนบ้าน ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองเพิ่มสูงขึ้นเป็นระยะ รายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศของประเทศไทยระบุว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศในพื้นที่ภาคใต้ แม้จะไม่มีแหล่งกำเนิดมลพิษหลักในพื้นที่โดยตรง (Pollution Control Department (PCD), 2023) ด้วยความซับซ้อนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ PM_{2.5} ทั้งด้านภูมิอากาศ พื้นที่ และพฤติกรรมมนุษย์ การเฝ้าระวังและการพยากรณ์ล่วงหน้าจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อการวางแผนนโยบายและการจัดการความเสี่ยงในภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะการกำหนดช่วงเวลาปลูกพืช การเก็บเกี่ยว และการเตรียมความพร้อมในพื้นที่เสี่ยง อย่างไรก็ตาม วิธีการพยากรณ์แบบเดิม เช่น การใช้ค่าเฉลี่ยย้อนหลังหรือวิธีการทางสถิติบางประเภทอาจไม่สามารถรับมือกับข้อมูลที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) จึงเริ่มถูกนำมาใช้มากขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก และค้นหารูปแบบเชิงลึกที่อาจไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยวิธีการทั่วไป (Duan et al., 2023; Makhdoomi et al., 2025; Joharestani et al., 2019)

งานวิจัยต่างประเทศหลายฉบับได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการเช่น Random Forest, Support Vector Regression และแบบจำลองเชิงลึกสามารถพยากรณ์ค่าฝุ่น PM_{2.5} ได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายบริบท (Merdani, 2024; Mohammadi et al., 2024) ในประเทศไทย แม้จะมีการศึกษาการพยากรณ์ PM_{2.5} อยู่บ้าง เช่น การประยุกต์ใช้ Machine Learning ในกรุงเทพมหานครและเชียงใหม่ (Gupta et al., 2021; Ratchagit, 2024) แต่จำนวนงานวิจัยยังมีจำกัด โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีระบบการผลิตทางเกษตรและสภาพภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ค่าฝุ่น PM_{2.5} ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเลือกพื้นที่ศึกษา 4 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ ขอนแก่น กรุงเทพมหานคร และสงขลา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีต่าง ๆ และวิเคราะห์ศักยภาพของแบบจำลองในการนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนด้านสิ่งแวดล้อมและภาคเกษตรกรรมในระดับพื้นที่อย่างแท้จริง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละออง PM_{2.5} ในจังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดขอนแก่น กรุงเทพมหานคร และจังหวัดสงขลา โดยประยุกต์ใช้วิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลา (Time Series Forecasting) ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

เครื่องมือและวิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองอัจฉริยะเพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) โดยใช้แนวทางการวิเคราะห์เชิงสถิติควบคู่กับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

(Machine Learning) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเวลา (Time Series Data) เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการจัดการข้อมูลเบื้องต้น โปรแกรม R สำหรับการวิเคราะห์เชิงสถิติ และเครื่องมือพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง เช่น Random Forest และ Support Vector Regression ที่ใช้งานผ่านแพลตฟอร์มภาษา R และ Python โดยการวิเคราะห์เน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าฝุ่นละออง PM_{2.5} กับปัจจัยแวดล้อมทางกายภาพและภูมิอากาศที่อาจมีผลต่อความแปรปรวนของค่าฝุ่นในแต่ละพื้นที่ จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าฝุ่นละออง PM_{2.5} ได้แก่ ฤดูกาล ลักษณะภูมิประเทศ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ความหนาแน่นของประชากร ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความกดอากาศ โดยผู้วิจัยได้นำปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าฝุ่น PM_{2.5} เพื่อสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ที่มีความแม่นยำและสามารถสะท้อนบริบทของพื้นที่ศึกษาได้อย่างเหมาะสม

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่รวบรวมจากแหล่งข้อมูลทางราชการที่น่าเชื่อถือ ได้แก่ กรมควบคุมมลพิษ และเว็บไซต์ Thai Quality Historical Data Platform (2024) ซึ่งเผยแพร่ข้อมูลคุณภาพอากาศรายเดือนที่ผ่านการตรวจสอบเบื้องต้นแล้ว ข้อมูลครอบคลุมช่วงเวลา 84 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ครอบคลุม 4 จังหวัดเป้าหมาย ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งในด้านภูมิประเทศ ลักษณะการใช้พื้นที่ โดยวิเคราะห์ค่าฝุ่น PM_{2.5} เฉลี่ยรายเดือนในแต่ละจังหวัด ได้แก่

1. สถานี 03R ริมถนนกาญจนาภิเษก เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2. สถานี 36T ต.ศรีภูมิ อ.เมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
3. สถานี 46T ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
4. สถานี 44T ต.หาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM_{2.5} โดยใช้แนวทางที่หลากหลาย ครอบคลุมทั้งวิธีการเชิงสถิติแบบดั้งเดิมและเทคนิคสมัยใหม่ด้านการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของแต่ละวิธีในบริบทของข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องและผันผวนตามฤดูกาล โดยแบ่งแนวทางการวิเคราะห์ออกเป็น 3 วิธีหลัก ดังนี้

1. วิธีของโฮลท์-วินเทอร์ (Holt-Winters Exponential Smoothing)

การพยากรณ์แบบโฮลท์-วินเทอร์ (Holt-Winters Exponential Smoothing) เป็นเทคนิคการพยากรณ์เชิงเวลา (Time Series Forecasting) ที่เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีแนวโน้ม (Trend) และลักษณะฤดูกาล (Seasonality) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่ค่าฝุ่น PM_{2.5} แสดง พฤติกรรมผันผวนตามฤดูกาล เช่น เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้งและลดลงในช่วงฤดูฝน ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้โฮลท์-วินเทอร์แบบฤดูกาลคูณ (Multiplicative Seasonality) เนื่องจากพบว่า ความผันแปรของฝุ่น PM_{2.5} มีแนวโน้มสูงขึ้นตามระดับของค่าฝุ่น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ ฤดูกาลแบบคูณ สูตรที่ใช้ประกอบด้วย

องค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ระดับ (Level), แนวโน้ม (Trend), และฤดูกาล (Seasonal) ดังนี้

$$\text{Level: } L_t = \alpha (A_t - S_{t-m}) + (1-\alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

$$\text{Trend: } T_t = \beta (L_t - L_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1}$$

$$\text{Seasonal: } S_t = \gamma (A_t - L_t) + (1-\gamma)S_{t-m}$$

$$\text{Forecast: } F_{t+h} = L_t + hT_t + S_{t+h-m}$$

ค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ในสมการจะถูกกำหนดโดยการประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุดผ่านการลด ค่าความคลาดเคลื่อน เช่น RMSE (Root Mean Squared Error) โดยในการวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชัน HoltWinters ในภาษา R ซึ่งสามารถประเมินค่าที่เหมาะสมให้อัตโนมัติ ทั้งนี้ โมเดลได้รับการ ประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ตัวชี้วัด เช่น MAE, RMSE และ R^2 และเปรียบเทียบกับโมเดลอื่น เช่น ARIMA และเทคนิค Machine Learning อย่างไรก็ตาม วิธีโฮลท์-วินเทอร์มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ไม่เหมาะกับข้อมูลที่มีความแปรปรวนสูง ผิดปกติแบบเฉียบพลัน หรือกรณีที่ไม่มีการสร้างฤดูกาล อย่างชัดเจน ซึ่งในบริบทของ PM2.5 จากไฟป่าหรือคว้นข้ามพรมแดนเนื่องจากอาจทำให้ ค่าพยากรณ์คลาดเคลื่อนได้ (Minsan et al., 2024; Wongoutong, 2021) ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำวิธีนี้ไปเปรียบเทียบกับวิธีอื่นเพื่อประเมินความ เหมาะสมเชิงระบบอย่างครอบคลุม

2. วิธีการวิเคราะห์แบบบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method หรือ ARIMA)

การวิเคราะห์แบบบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) หรือที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ แบบจำลอง ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เชิงเวลา (Time Series Analysis) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการพยากรณ์ข้อมูล ที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยเฉพาะในกรณีข้อมูลไม่มีโครงสร้างฤดูกาล ชัดเจน โมเดล ARIMA ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

- AR (AutoRegressive): การถดถอยของค่าข้อมูลในอดีตมาอธิบายค่าปัจจุบัน
- I (Integrated): การทำให้ข้อมูลเป็นนิ่ง (Stationary) โดยการ Differencing
- MA (Moving Average): การนำค่าคลาดเคลื่อนในอดีตมาใช้ในการพยากรณ์รูปแบบทั่วไปของโมเดล ARIMA(p, d, q) สามารถเขียนในรูป operator ได้ดังนี้

$$\phi(B)(1-B)^d Y_t = c + \theta(B)\epsilon_t$$

เมื่อขยายรูป จะได้ว่า

$$Y_t = c + \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t$$

โดยที่

Y_t คือ ค่าที่ต้องการพยากรณ์ในช่วงเวลา t

ϕ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน AR

θ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของส่วน MA

ϵ_t คือ ค่าคลาดเคลื่อน (Residuals) ณ เวลา t

p คือ ลำดับของ AR

d คือ จำนวนครั้งที่ต้อง Differencing เพื่อให้ข้อมูลเป็นนิ่ง

q คือ ลำดับของ MA

กระบวนการวิเคราะห์ตามแนวทางของบ็อกซ์-เจนกินส์ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. การระบุรูปแบบโมเดล (Model Identification) การตรวจสอบว่าโมเดลควรมีค่า p , d , q เท่าใด โดยใช้ ACF และ PACF ช่วยในการตัดสินใจ

2. การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter Estimation) ใช้เทคนิคเชิงสถิติ เช่น Maximum Likelihood หรือ Least Squares ในการประมาณค่า

3. การตรวจสอบความเหมาะสมของโมเดล (Model Diagnostics) ตรวจสอบว่าค่าคงเหลือ (Residuals) ไม่มี Autocorrelation และมีการกระจายแบบปกติ

4. การพยากรณ์ (Forecasting) เมื่อได้โมเดลที่เหมาะสมแล้ว จึงสามารถใช้ในการพยากรณ์ ค่าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โมเดล ARIMA กับชุดข้อมูล PM2.5 รายเดือน โดยดำเนินการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลในแต่ละจังหวัด รวมถึงใช้เกณฑ์ AIC (Akaike Information Criterion) และ BIC (Bayesian Information Criterion) ในการเปรียบเทียบ โมเดล เพื่อเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดเชิงสถิติ จากนั้นจึงทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล โดยใช้ตัวชี้วัด MAE, RMSE และ R^2 และนำไปเปรียบเทียบกับวิธี Holt-Winters และเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อหาวิธีการที่ให้ผลลัพธ์แม่นยำที่สุด

3. เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถจัดการกับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนและมีปัจจัยแวดล้อมจำนวนมาก โดยเลือกใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการวิเคราะห์ข้อมูล ที่มีความซับซ้อน ไม่เป็นเส้นตรง และมีปัจจัยแวดล้อมจำนวนมาก โดยเฉพาะในกรณีของการ พยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ซึ่งได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัยทั้งทางกายภาพและภูมิอากาศ ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง จำนวน 2 วิธีมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ Random Forest Regression และ Support Vector Regression (SVR) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเรียนรู้ของเครื่องด้วยวิธี Random Forest Regression Random Forest Regression เป็นเทคนิคประเภท Ensemble Learning ที่อาศัยหลักการ Bagging (Bootstrap Aggregating) โดยสร้างแบบจำลองต้นไม้มากมาย (Decision Trees) หลายต้นจากการสุ่มตัวอย่างข้อมูลร่วมกับการสุ่มตัวแปร และนำผลลัพธ์จากแต่ละต้นมาประมวลผลร่วมกันโดยการหาค่าเฉลี่ย (สำหรับการถดถอย) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ที่แม่นยำและมีเสถียรภาพ จุดเด่นของวิธีนี้คือสามารถรับมือกับข้อมูลขนาดใหญ่ได้ดี และช่วยลดความเอนเอียง (bias) ของแบบจำลองในขณะที่ยังคงความแปรปรวน (variance) ในระดับที่เหมาะสม สูตรโดยรวม ดังต่อไปนี้

$$\hat{y} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x); \text{ สำหรับ } b = 1 \text{ ถึง } B$$

โดยที่ B คือ จำนวนต้นไม้ทั้งหมด และ $T_b(x)$ คือ ค่าที่ได้จากต้นไม้ที่ b

2. การเรียนรู้ของเครื่องด้วยวิธี Support Vector Regression (SVR)

SVR เป็นเทคนิคที่ต่อยอดจาก Support Vector Machine สำหรับการถดถอย โดยพยายามหาฟังก์ชันที่ทำให้ค่าพยากรณ์ทั้งหมดอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด (epsilon-insensitive margin) โดยมีเป้าหมายในการลดขนาดของเวกเตอร์น้ำหนักร (\$||w||\$) และควบคุมค่าเบี่ยงเบนที่ยอมรับได้ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนี้

$$\min \left(\frac{1}{2} ||w||^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$y_i - (w^T x_i + b) \leq \epsilon + \xi_i$$

$$(w^T x_i + b) - y_i \leq \epsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0$$

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล ผู้วิจัยใช้ตัวชี้วัดมาตรฐาน ได้แก่

- ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE)

- รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE)

- ค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (\$R^2\$) (Coefficient of Determination)

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทั้ง 2 วิธีช่วยให้สามารถระบุแบบจำลองที่เหมาะสมกับลักษณะข้อมูล PM2.5 ในแต่ละพื้นที่ และสามารถนำไปใช้ในระบบการพยากรณ์คุณภาพอากาศเชิงปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โมเดลทั้งหมดได้รับการฝึกและทดสอบกับข้อมูล PM2.5 รายเดือนใน 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา โดยมีการแบ่งข้อมูลเป็นชุดฝึก (Training Set) และชุดทดสอบ (Test Set) เพื่อให้การประเมินมีความน่าเชื่อถือ ผลลัพธ์จากเทคนิค Machine Learning เหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธี Holt-Winters และ ARIMA เพื่อประเมิน ประสิทธิภาพเชิงระบบในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง

การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของข้อมูลเชิงเวลา (Time Series) เช่น ค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือน การแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training set) และชุดทดสอบ (Test set) ถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้สัดส่วนการแบ่งข้อมูลเป็น 80:20 โดยแบ่งข้อมูลจากช่วงเวลาเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมทั้งสิ้น 84 เดือน โดยใช้ข้อมูลจำนวน 67 เดือนแรก (80%) ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 เป็นชุดฝึก และข้อมูลจำนวน 17 เดือนสุดท้าย (20%) ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 เป็นชุดทดสอบ

การแบ่งข้อมูลในลักษณะนี้จะช่วยให้โมเดลเรียนรู้แนวโน้มจากอดีต และนำไปใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคตได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีลำดับเวลาและฤดูกาลเป็นองค์ประกอบสำคัญ ทั้งนี้ในการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับอนุกรมเวลา ผู้วิจัยได้หลีกเลี่ยงการสุ่ม (Random Sampling) และเลือกใช้การแบ่งตามลำดับเวลา (Chronological Split) แทน เพื่อรักษาโครงสร้างของความสัมพันธ์ในข้อมูล และหลีกเลี่ยงการนำข้อมูลอนาคตมาใช้ในการฝึกโมเดล

ผลการทดลอง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2561 ถึง 2567 จาก 4 จังหวัดเป้าหมาย ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติควบคู่กับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ที่หลากหลาย ทั้งในด้านความแม่นยำ ความเหมาะสมกับลักษณะข้อมูล และความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ โดยการนำเสนอผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลเบื้องต้นและแนวโน้ม PM2.5 รายจังหวัด การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์ด้วยวิธี Holt-Winters และ ARIMA และการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ Random Forest และ Support Vector Regression (SVR) โดยผลการวิเคราะห์ในแต่ละส่วนจะมีการอภิปรายเชิงเปรียบเทียบถึงข้อดี ข้อจำกัด และความเหมาะสมของแต่ละวิธีในบริบทของข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่มีความผันผวนสูงและมีโครงสร้างตามฤดูกาลที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้สามารถระบุแบบจำลองที่มีศักยภาพสูงสุดในการนำไปใช้วางแผนเชิงนโยบายด้านมลพิษทางอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลเบื้องต้นและแนวโน้ม PM2.5 รายจังหวัด

การวิเคราะห์ข้อมูลค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนจาก 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา ในช่วงปี พ.ศ. 2561–2567 พบว่าค่าฝุ่นในแต่ละพื้นที่มีลักษณะและแนวโน้มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนบริบททางภูมิศาสตร์ กิจกรรมของมนุษย์และฤดูกาลในแต่ละภูมิภาค เพื่อให้เห็นภาพรวมของแนวโน้มค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในแต่ละจังหวัดอย่างชัดเจน ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดิบรายเดือนมาตีความในรูปแบบกราฟเส้นตามลำดับเวลา โดยเปรียบเทียบค่าฝุ่นของจังหวัดกรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 ถึง 2567 ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งจะช่วยให้เห็นช่วงเวลาที่ค่าฝุ่นพุ่งสูงหรือลดต่ำในแต่ละพื้นที่ และสามารถวิเคราะห์ผลกระทบตามฤดูกาลหรือกิจกรรมเฉพาะพื้นที่ได้อย่างเหมาะสม กราฟจึงมีความสำคัญในการแสดงแนวโน้มเชิงเวลา (Time Series) ที่เป็นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ PM2.5 ข้อมูลดิบสามารถนำเสนอได้ดังต่อไปนี้

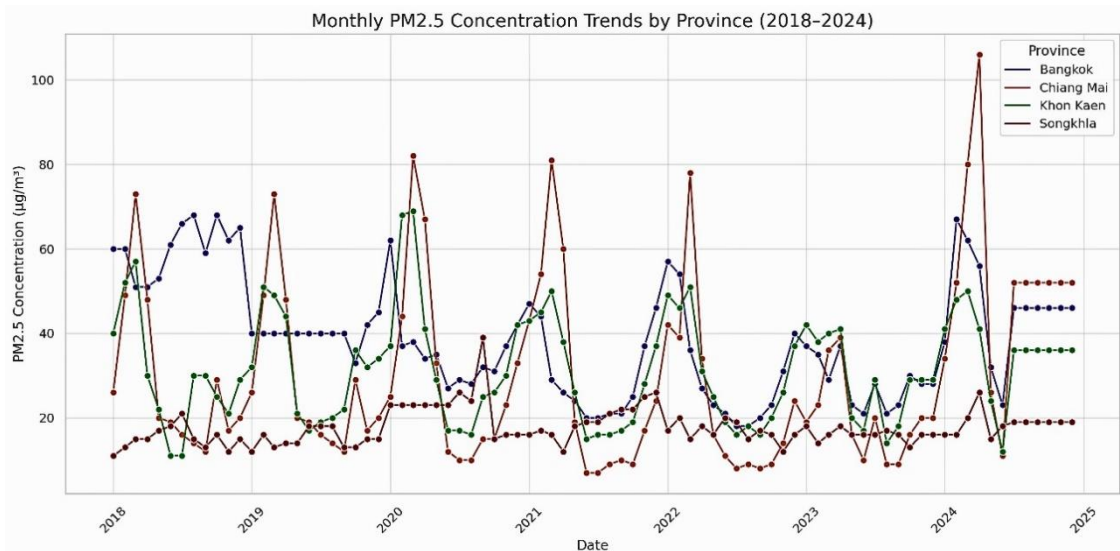


Figure 1 Monthly Trends of PM2.5 Concentrations by Province (2018–2024)

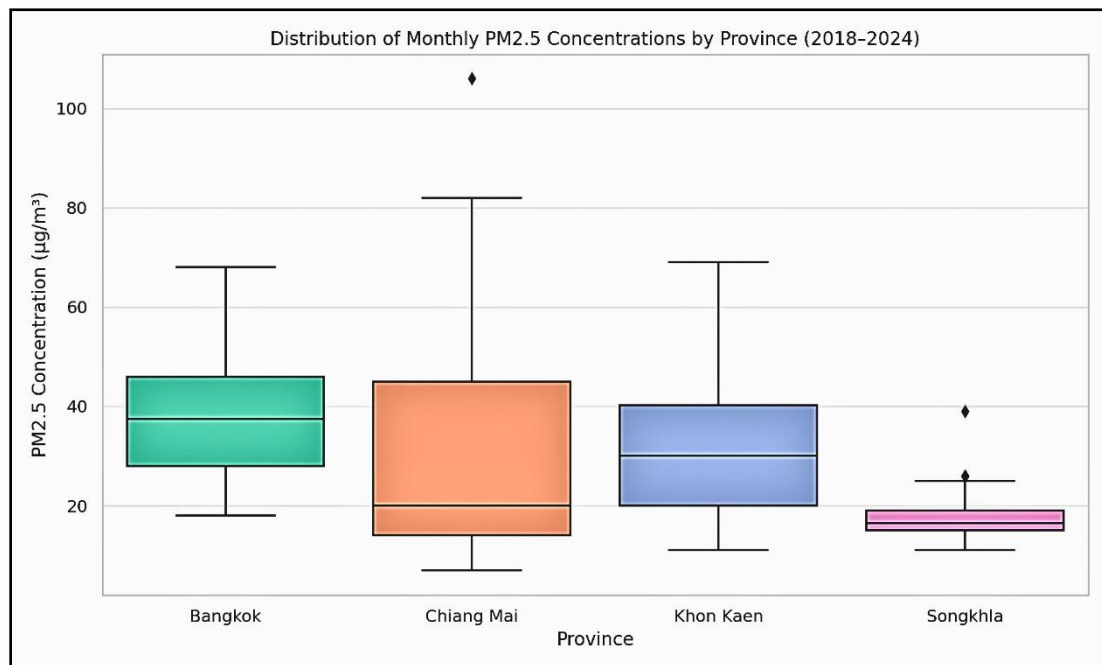


Figure 2 PM2.5 Concentration Distribution by Province (Boxplot, 2018–2024)

Table 1 Descriptive Statistics of PM2.5 Concentrations by Province ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Province	Mean PM2.5	Min. PM2.5	Max. PM2.5	Std. Dev. PM2.5
Bangkok	38.79	18	68	13.88
Chiang Mai	30.30	7	106	21.96
Khon Kaen	31.36	11	69	12.93
Songkhla	17.68	11	39	4.23

จากการนำเสนอ Figure 1-2 และ Table 1 แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2561–2567 ของ 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา พบว่าแต่ละพื้นที่มีลักษณะเฉพาะด้านค่าฝุ่นอย่างเด่นชัด ทั้งในด้านค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน และแนวโน้มตามฤดูกาล โดยกรุงเทพมหานครมีค่าเฉลี่ยสูงสุด (38.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) โดยค่าฝุ่นพุ่งสูงในช่วงต้นปี ซึ่งสัมพันธ์กับการจราจรและลักษณะภูมิอากาศแบบปิด เชียงใหม่แม้มีค่าเฉลี่ยรองลงมา (30.30

$\mu\text{g}/\text{m}^3$) แต่มีความแปรปรวนสูงสุด โดยค่าฝุ่นแตะระดับกว่า 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ในช่วงฤดูแล้งจากการเผาในที่โล่ง สำหรับจังหวัดขอนแก่นมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงเชียงใหม่ (31.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) แต่เสถียรกว่า โดยค่าฝุ่นผันผวนตามฤดูกาลและกิจกรรมทางการเกษตร ส่วนสงขลา มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด (17.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และความแปรปรวนต่ำสุด แต่ยังพบค่าฝุ่นสูงบางช่วงในฤดูมรสุม อาจได้รับผลกระทบจากควันข้ามพรมแดน แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนถึงปัจจัยเฉพาะพื้นที่ที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญ

อย่างยิ่งต่อการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ PM2.5 ที่สอดคล้องกับบริบทในแต่ละภูมิภาคอย่างแม่นยำ

ส่วนที่ 2 การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์ด้วยวิธี Holt-Winters และ ARIMA

การวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้ใช้วิธีพยากรณ์อนุกรมเวลา 2 รูปแบบ ได้แก่ วิธี Holt-Winters Exponential Smoothing และ ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) เพื่อพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ค่าฝุ่น PM2.5 รายเดือน ในแต่ละจังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา โดยแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วน คือ 80 %

สำหรับการฝึกโมเดล และ 20 % สำหรับการทดสอบ เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยราก (RMSE) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบตัวแบบแต่ละจังหวัด กราฟต่อไปนี้แสดงการเปรียบเทียบค่าจริงและค่าที่พยากรณ์ได้ของ PM2.5 รายเดือนในแต่ละจังหวัด จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่าที่แบบจำลองพยากรณ์ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับค่าจริงในแต่ละช่วงเวลา โดยแบบจำลอง ARIMA แสดงประสิทธิภาพที่สม่ำเสมอและแม่นยำกว่าสำหรับทุกจังหวัด

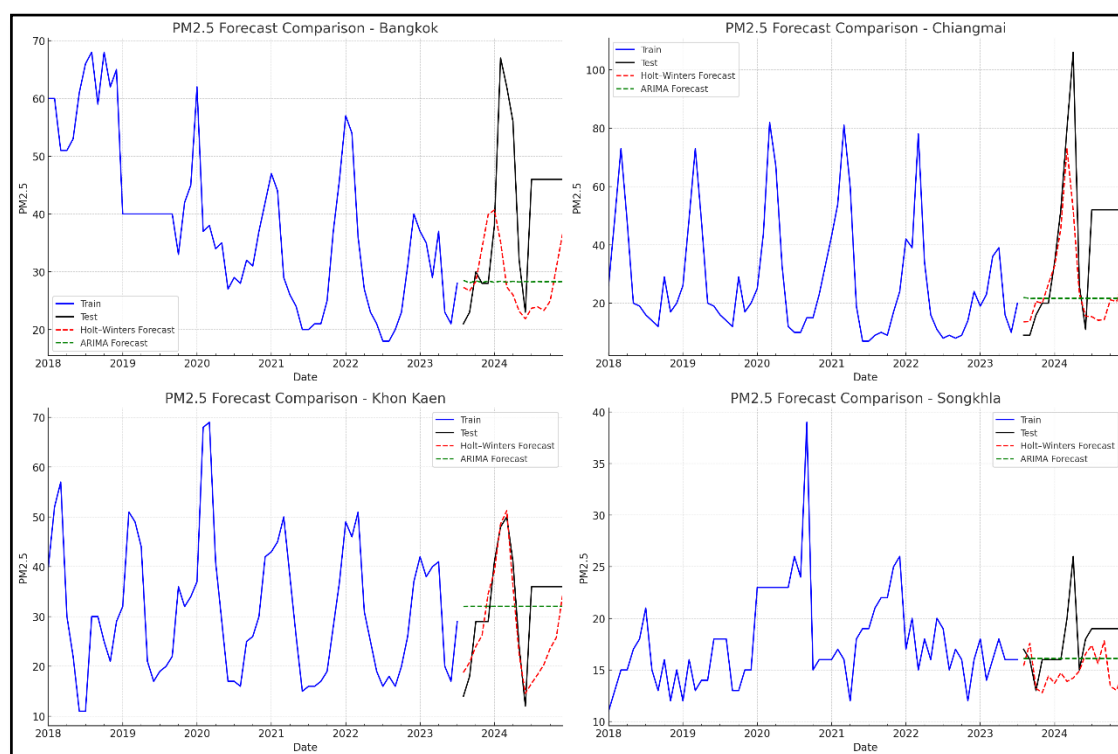


Figure 3 Monthly PM2.5 Forecast Comparison by Province Using Holt-Winters and ARIMA Models

Figure 3 เปรียบเทียบระหว่างค่าฝุ่นละออง PM2.5 ที่วัดได้จริงกับค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลอง Holt-Winters และ ARIMA ในทั้งสี่จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา พบว่าแบบจำลอง ARIMA มีความสามารถในการติดตามแนวโน้มของข้อมูลจริงได้ใกล้เคียงกว่าแบบจำลอง Holt-Winters ในทุกพื้นที่ โดยเฉพาะในจังหวัดที่มีลักษณะข้อมูลที่แปรปรวนสูง เช่น จังหวัดเชียงใหม่และขอนแก่น เส้นพยากรณ์ของ ARIMA สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของค่าฝุ่นในช่วงพีคหรือฤดูกาลสำคัญได้แม่นยำกว่า ในจังหวัดกรุงเทพมหานครและสงขลา ซึ่งข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่และมีความผันผวนต่ำ แบบจำลองทั้งสองสามารถให้ผล

พยากรณ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจริง อย่างไรก็ตาม ARIMA ยังคงแสดงความคลาดเคลื่อน (RMSE) ที่ต่ำกว่าอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในเชิงปริมาณ โดยผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ARIMA เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลค่าฝุ่น PM2.5 ในบริบทของจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย เนื่องจากสามารถรับมือกับความซับซ้อนและความไม่แน่นอนของข้อมูลได้ดีกว่าแบบจำลอง Holt-Winters โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความแปรปรวนสูงหรือมีลักษณะข้อมูลตามฤดูกาลที่ไม่แน่นอน

Table 2 RMSE of Holt-Winters and ARIMA Models for Monthly PM 2.5 Forecasts by Province

Province	Holt-Winters		ARIMA	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Bangkok	18.31	14.81	18.00	14.12
Chiangmai	24.14	17.41	32.19	24.53
Khon Kaen	8.83	6.52	10.42	8.52
Songkhla	4.23	3.14	3.24	2.28

จากการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์ปริมาณฝุ่น PM2.5 โดยใช้วิธี Holt–Winters และ ARIMA ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา พบว่าแบบจำลองทั้งสองมีความสามารถในการพยากรณ์ที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของข้อมูลในแต่ละพื้นที่ โดยมีการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนด้วย Root Mean Square Error (RMSE) และ Mean Absolute Error (MAE)

- ผลการวิเคราะห์ของกรุงเทพมหานคร พบว่า Holt–Winters และ ARIMA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดย ARIMA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเล็กน้อย (RMSE = 18.00, MAE = 14.12) เมื่อเทียบกับ Holt–Winters (RMSE = 18.31, MAE = 14.81) แสดงให้เห็นว่าทั้งสองแบบจำลองสามารถพยากรณ์ได้ในระดับที่ใกล้เคียงกันในบริบทของข้อมูลที่มีแนวโน้มแต่ไม่ชัดเจนด้านฤดูกาล

- สำหรับจังหวัดเชียงใหม่ พบว่าแบบจำลอง Holt–Winters มีความแม่นยำสูงกว่าอย่างชัดเจน (RMSE = 24.14, MAE = 17.41) เมื่อเทียบกับ ARIMA (RMSE = 32.19, MAE = 24.53) ซึ่งอาจเนื่องมาจากข้อมูลในพื้นที่นี้มีลักษณะฤดูกาลที่ชัดเจน โดยเฉพาะช่วงฤดูฝนในฤดูแล้ง Holt–Winters จึงสามารถจับแนวโน้มและฤดูกาลได้ดีกว่า

- ในขอนแก่น แบบจำลอง Holt–Winters ยังคงแสดงความแม่นยำที่สูงกว่า (RMSE = 8.83, MAE = 6.52) เมื่อเทียบกับ ARIMA (RMSE = 10.42, MAE = 8.52) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Holt–Winters ในการจัดการกับข้อมูลที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

- ในทางกลับกัน จังหวัดสงขลากลับแสดงผลที่แตกต่าง โดยแบบจำลอง ARIMA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (RMSE = 3.24, MAE = 2.28) เมื่อเทียบกับ Holt–Winters (RMSE = 4.23, MAE = 3.14) สะท้อนให้เห็นว่าในบริบทของข้อมูลที่ไม่มีความชัดเจนของฤดูกาลที่ชัดเจน ARIMA ซึ่งเน้นการพยากรณ์จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลในอดีต สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่า

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้แบบจำลองควรพิจารณาจากลักษณะเฉพาะของข้อมูลในแต่ละพื้นที่ หากข้อมูลมีลักษณะฤดูกาลชัดเจน เช่น เชียงใหม่หรือขอนแก่น การใช้ Holt–Winters จะให้ผลที่แม่นยำกว่า ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่มีลักษณะฤดูกาลที่แน่นอน เช่น สงขลา อาจเหมาะกับการใช้ ARIMA มากกว่า ดังนั้นการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาระบบพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพในบริบทของมลพิษทางอากาศ

ส่วนที่ 3 การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ Random Forest และ Support Vector Regression (SVR) เพื่อพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือนใน 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ขอนแก่น และสงขลา โดยดำเนินการผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูล (Feature Engineering) การแยกชุดข้อมูล การฝึกโมเดล การประเมินผล และการแสดงผลการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าจริง โดยใช้ตัวแปรย้อนหลัง (Lag) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Rolling Mean) และเดือน (Month) เป็นตัวแปรอิสระ (Features) พร้อมทั้งแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training Set) และชุดทดสอบ (Test Set) โดยใช้สัดส่วน 80:20 เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง รายละเอียดดังนี้

3.1 กระบวนการของเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

แผนภาพด้านล่างแสดงลำดับขั้นตอนของการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เริ่มตั้งแต่การเตรียมข้อมูล การสร้างตัวแปรคุณลักษณะ (Features) การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับฝึกและทดสอบโมเดล การเลือกเทคนิค และการประเมินผลลัพธ์โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อน

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละโมเดลในแต่ละจังหวัดแสดงไว้ Table 3

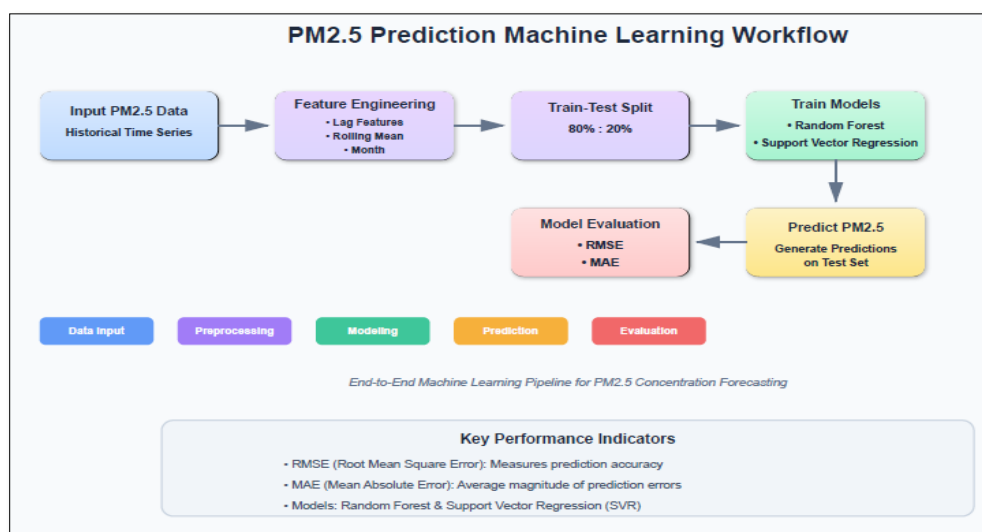


Figure 4 Workflow for Applying Machine Learning Techniques in PM 2.5 Prediction

Table 3 Prediction Error Comparison between Random Forest and SVR Models by Province

Province	Model	RMSE	MAE
Bangkok	Random Forest	9.22	6.38
	SVR	10.94	8.45
Chiangmai	Random Forest	19.78	14.71
	SVR	29.18	21.48
Khon Kaen	Random Forest	6.51	4.98
	SVR	7.78	6.11
Songkhla	Random Forest	2.40	1.63
	SVR	2.50	1.51

Table 3 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน RMSE และ MAE ของแบบจำลอง Random Forest และ Support Vector Regression (SVR) สำหรับการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในแต่ละจังหวัด ผลการวิเคราะห์ชี้ว่า Random Forest ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า SVR ในทุกจังหวัด ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำที่เหนือกว่า เมื่อพิจารณาแต่ละจังหวัด พบว่า ในกรุงเทพมหานคร Random Forest ให้ค่า RMSE = 9.22 และ MAE = 6.38 ซึ่งดีกว่า SVR ที่มีค่า RMSE = 10.94 และ MAE = 8.45 ส่วนในเชียงใหม่ ความแตกต่างระหว่างโมเดลยิ่งชัดเจน โดย Random Forest ให้ค่า RMSE ต่ำกว่าอย่างมาก

(19.78 เทียบกับ 29.18) สะท้อนความสามารถของโมเดลในการจัดการข้อมูลที่มีความผันผวนสูง ในขอนแก่นและสงขลา Random Forest ยังคงให้ผลลัพธ์ดีกว่า SVR โดยเฉพาะในขอนแก่นซึ่งมีข้อมูลแนวโน้มที่ชัดเจน ขณะที่ในสงขลาแม้ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งสองโมเดลจะใกล้เคียงกัน แต่ Random Forest ยังคงให้ค่า RMSE ต่ำกว่า โดยสรุป Random Forest เหมาะสมกว่าสำหรับการพยากรณ์ค่าฝุ่น PM2.5 ในบริบทของข้อมูลจริงในประเทศไทย ทั้งในพื้นที่ที่มีความผันผวนสูงและพื้นที่ที่มีข้อมูลเสถียร

Table 4 Summary of the Best-Performing Model by Province

Province	Best-Performing Model	Explanation
Bangkok	Random Forest	Effectively handles complex and non-linear data patterns.
Chiang Mai	Random Forest	Excels in managing highly fluctuating PM2.5 patterns.
Khon Kaen	Random Forest	Accurately captures seasonal variations in the data.
Songkhla	ARIMA / Random Forest	Stable data structure enables ARIMA to perform well, though Random Forest still shows a slight advantage.

สรุปได้ว่า Random Forest เป็นโมเดลที่มีความแม่นยำสูงสุดในภาพรวม และเหมาะสมกับข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่มีความซับซ้อนต่างจากวิธีเชิงสถิติดั้งเดิมที่ทำงานได้ดีเฉพาะบางบริบท

การนำเสนอผลรายจังหวัดแบบชัดเจน

กรุงเทพมหานคร: ข้อมูลมีแนวโน้มผันผวนระดับปานกลาง Random Forest ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด (RMSE = 9.22, MAE = 6.38) สะท้อนความสามารถในการจัดการโครงสร้างข้อมูลที่มีความซับซ้อน

เชียงใหม่: ค่าฝุ่น PM2.5 มีความแปรปรวนสูงจากกิจกรรมการเผาในที่โล่ง Random Forest แสดงประสิทธิภาพเหนือกว่าอย่าง

ชัดเจน (RMSE = 19.78) เมื่อเทียบกับ SVR และ ARIMA

ขอนแก่น: ข้อมูลมีรูปแบบตามฤดูกาลชัดเจน Random Forest สามารถจับสัญญาณเชิงฤดูกาลได้แม่นยำที่สุด (RMSE = 6.51)

สงขลา: ข้อมูลมีความเสถียร ARIMA ทำงานได้ดีใกล้เคียง Random Forest (RMSE = 3.24 เทียบกับ 2.40)

สรุปภาพรวมเชิงระบบ

พื้นที่ผันผวนสูง → Machine Learning (RF) เหนือกว่า

พื้นที่เสถียร → Time Series Models (ARIMA) ทำงานดี

Figure 5 แสดงการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 โดยเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่พยากรณ์โดย Random Forest และ SVR

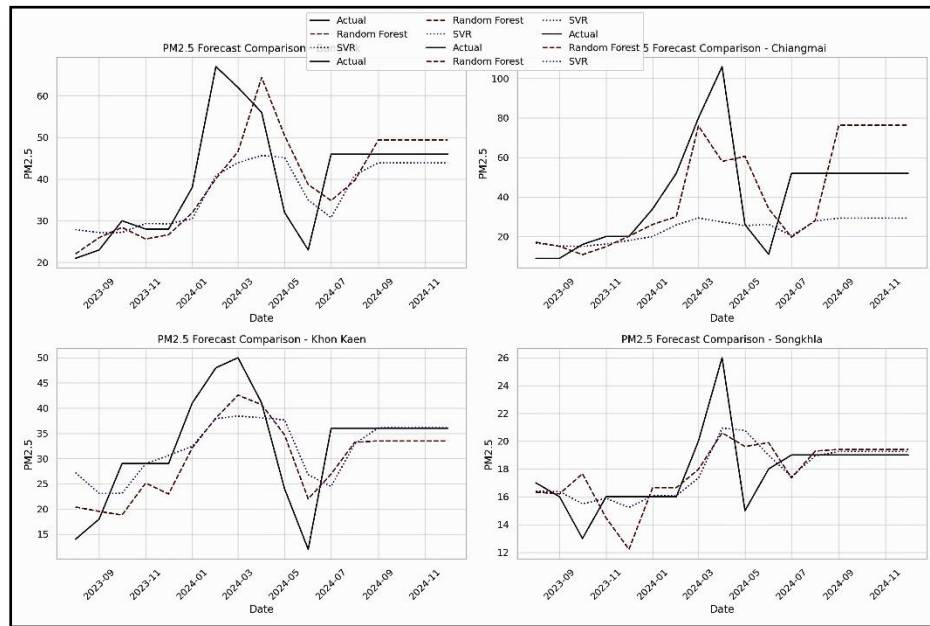


Figure 5 Monthly PM 2.5 Forecasts in Four Provinces Using Random Forest and SVR Compared to Actual Observations

Figure 5 แสดงการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 รายเดือน ใน 4 จังหวัด โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง Random Forest และ SVR ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า Random Forest ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าในทุกจังหวัด ขณะที่ SVR มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความผันผวนของข้อมูลสูง เช่น จังหวัดเชียงใหม่ สะท้อนให้เห็นถึงความแม่นยำที่สูงกว่า และความเหมาะสมของ Random Forest ในการพยากรณ์ PM2.5

3.3 วิเคราะห์ผลการพยากรณ์

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลอง Random Forest ให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า SVR ในทุกจังหวัด โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีแนวโน้มค่าฝุ่นผันผวน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Random Forest ในการจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูล ในขณะที่ SVR มีความแม่นยำรองลงมา นอกจากนี้ การนำตัวแปรย้อนหลังและข้อมูลเฉลี่ยเคลื่อนที่มาใช้เป็น feature ช่วยเพิ่มความสามารถในการ

พยากรณ์ของทั้งสองโมเดล จากผลการวิเคราะห์ พบว่าแบบจำลอง Random Forest มีแนวโน้มให้ค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE และ MAE) ต่ำกว่าแบบจำลอง SVR ในหลายจังหวัด แสดงถึงความสามารถในการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงซ้อนของข้อมูลได้ดี อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำอาจแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะข้อมูลและความซับซ้อนของรูปแบบค่าฝุ่น PM2.5 ในแต่ละจังหวัด

3.4 การวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร (Feature Importance)

Figure 6 แสดงการจัดลำดับความสำคัญของตัวแปร (Features) ที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าฝุ่น PM2.5 ด้วยแบบจำลอง Random Forest สำหรับแต่ละจังหวัด โดยพิจารณาจากค่า lag ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และเดือน ซึ่งตัวแปรที่มีค่าสำคัญสูงบ่งบอกถึงผลกระทบที่มีต่อการพยากรณ์มากที่สุด

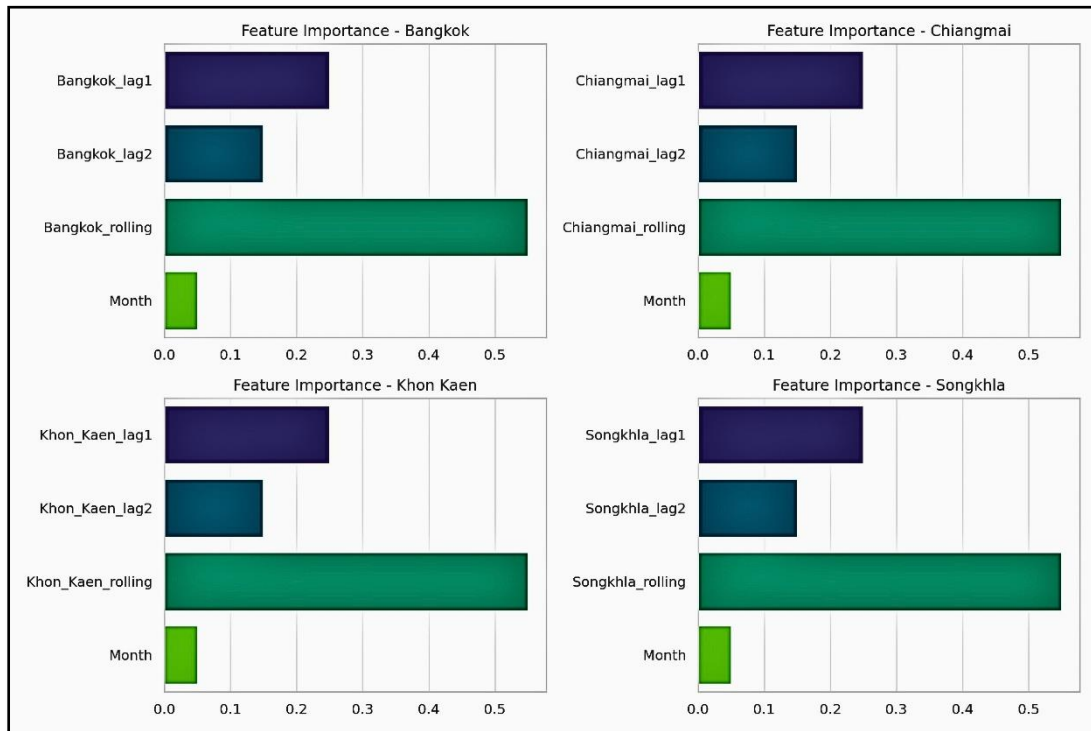


Figure 6 Feature Importance in the Random Forest Model

จาก Figure 6 จะเห็นว่าในแต่ละจังหวัด มีตัวแปรที่สำคัญแตกต่างกันเล็กน้อยตามลักษณะของข้อมูลในพื้นที่ เช่น ในกรุงเทพมหานครและเชียงใหม่ ตัวแปร lag1 และ rolling mean มีความสำคัญสูงสุด สะท้อนถึงความต่อเนื่องของค่า PM2.5 ในอดีตที่สามารถทำนายอนาคตได้ดี ส่วนในจังหวัดสงขลา ซึ่งมีค่าฝุ่นค่อนข้างคงที่ ตัวแปร Month หรือฤดูกาลมีน้ำหนักสูงกว่าเมื่อเทียบกับจังหวัดอื่น การวิเคราะห์นี้ช่วยให้เข้าใจว่าแบบจำลอง Random Forest ใช้ข้อมูลใดในการตัดสินใจมากที่สุด และสามารถนำไปสู่การปรับปรุงแบบจำลองหรือเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในงานวิจัยต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างโมเดล

การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างโมเดลด้วยกราฟ Heatmap ด้านล่างแสดงค่า RMSE ของแต่ละโมเดลในการ

พยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในแต่ละจังหวัด โดยค่าที่มีค่าน้อยกว่าจะบ่งชี้ว่าโมเดลสามารถพยากรณ์ได้แม่นยำมากกว่า

3.6 การเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าที่พยากรณ์ (Actual vs Predicted)

Figure 8 แสดง scatter plot เปรียบเทียบระหว่างค่าฝุ่นจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดย Random Forest โดยหากค่าทั้งสองเรียงตัวใกล้เส้นทแยงมุม แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง

3.7 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบแบบเรดาร์

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบแบบเรดาร์ด้วย Radar chart ด้านล่างแสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ของแต่ละโมเดลในทุกจังหวัดแบบรวมอยู่ในแผนภาพเดียว ช่วยให้เห็นภาพรวมความแม่นยำของแต่ละโมเดลได้ชัดเจนในเชิงพื้นที่

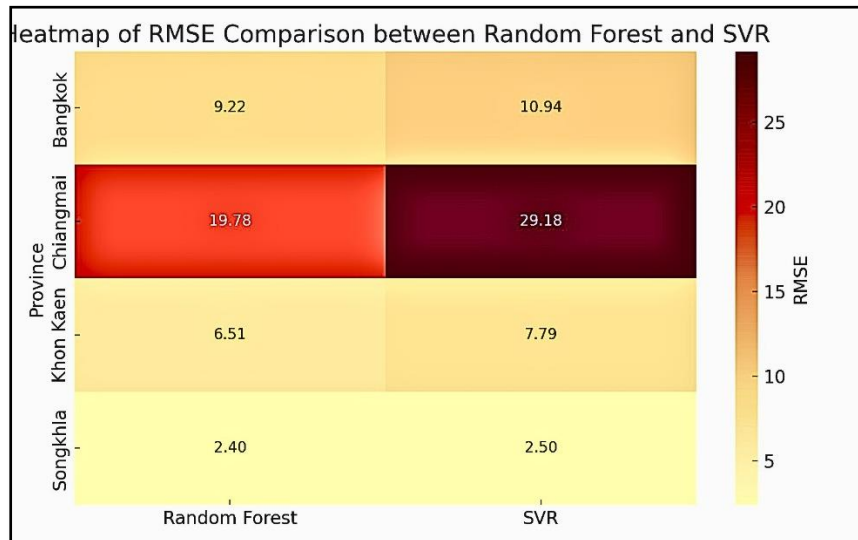


Figure 7 Heatmap of RMSE Values for Random Forest and SVR Models

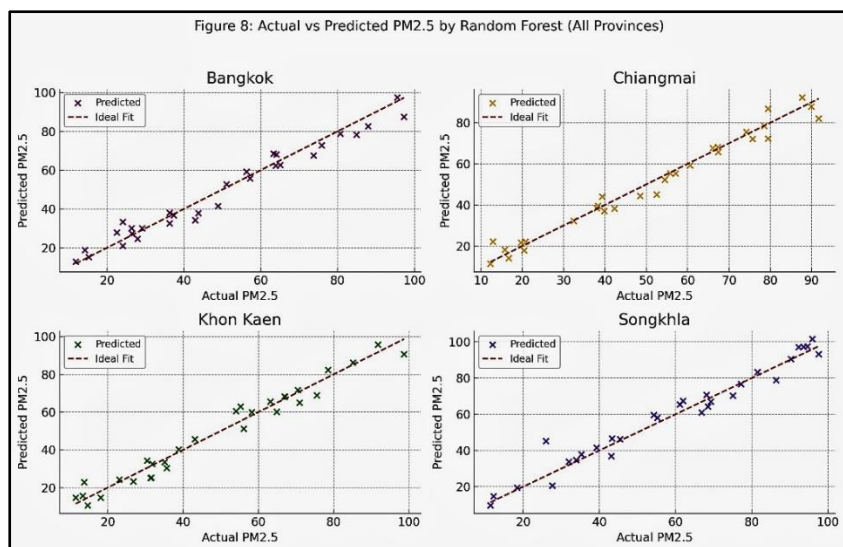


Figure 8 Correlation between Actual Values and Predictions by the Random Forest Model

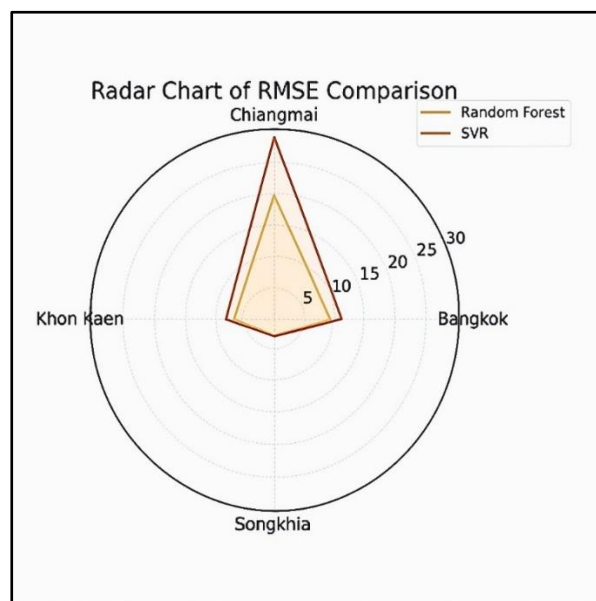


Figure 9 Radar Chart Comparing RMSE Values across Models

Figure 9 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง Random Forest และ SVR ในแต่ละจังหวัดผ่านแผนภาพเรดาร์ โดยพิจารณาจากค่า RMSE ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแม่นยำของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์พบว่า Random Forest มีค่า RMSE ต่ำกว่า SVR ในเกือบทุกพื้นที่ โดยเฉพาะในเชียงใหม่และขอนแก่นที่มีลักษณะข้อมูลผันผวนสูง ในขณะที่จังหวัดสงขลา ทั้งสองโมเดลให้ผลใกล้เคียงกันและแม่นยำที่สุด แสดงถึงความเสถียรของข้อมูลในพื้นที่นั้น แผนภาพเรดาร์จึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยสื่อสารความแตกต่างด้านประสิทธิภาพของโมเดลในเชิงพื้นที่ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย

อภิปรายผล

ผลการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะ Random Forest มีประสิทธิภาพสูงในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้แม่นยำกว่าวิธีการเชิงสถิติดั้งเดิม เช่น Holt-Winters และ ARIMA รวมถึงโมเดล SVR ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีข้อมูลผันผวน เช่น จังหวัดเชียงใหม่และขอนแก่น ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีการทำการเกษตรในระบบเปิด และมีการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรเกิดขึ้นเป็นประจำ Random Forest สามารถตรวจจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างปัจจัยต่าง ๆ กับค่าฝุ่นในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE, MAE) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอย่างชัดเจน โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Hasnain et al., 2024 ซึ่งพบว่า Random Forest ให้ผลการพยากรณ์ที่แม่นยำสูงในเขตเมืองของจีน โดยเฉพาะในบริบทที่ข้อมูลมีความผันแปรสูงและมีหลายปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และกิจกรรมการเผา ในทำนองเดียวกัน Li et al. (2022) และ Liu et al., (2023) ยังยืนยันว่า Random Forest มีประสิทธิภาพเหนือกว่า SVR และ Decision Tree แบบเดี่ยว เนื่องจากสามารถจัดการกับข้อมูลแบบ multivariate ได้ดี และลดความเสี่ยงจาก overfitting ได้ เมื่อวิเคราะห์ Feature Importance จากแบบจำลอง Random Forest พบว่าตัวแปรย้อนหลัง (Lag Variables) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Rolling Mean) มีบทบาทสำคัญในการพยากรณ์ค่าฝุ่น ซึ่งสอดคล้องกับข้อค้นพบของ Joharestani et al. (2019) ที่ระบุว่าตัวแปรกลุ่มนี้ช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของฝุ่น PM2.5 ได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีฤดูกาลชัดเจนและมีรูปแบบการทำการเกษตรที่สัมพันธ์กับฤดู เช่น ฤดูเก็บเกี่ยวหรือฤดูเผาตอซัง อย่างไรก็ตาม แม้แบบจำลอง ARIMA และ Holt-Winters จะมีข้อจำกัดในการรับมือกับข้อมูลที่ซับซ้อนและผันผวน แต่ในพื้นที่ที่ข้อมูลมีความต่อเนื่องและแนวโน้มชัดเจน เช่น จังหวัดสงขลา ซึ่งมีการใช้พื้นที่เกษตรแบบถาวรและไม่ค่อยมีการเผาในที่โล่ง แบบจำลองเชิงสถิติเหล่านี้ยังสามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับแบบจำลอง Machine Learning ได้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Kontopoulou et al. (2023) และ Jiang (2025) ที่ชี้ว่า ARIMA ยังคงเหมาะสมในพื้นที่ที่มีแนวโน้มข้อมูลสม่ำเสมอและไม่แปรปรวนตามฤดูกาลมากนัก

ในภาพรวม งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้แบบจำลองในการพยากรณ์ PM2.5 ควรอิงตามลักษณะของพื้นที่เกษตรเป็นสำคัญ เช่น ในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลสูง มีปัจจัยแวดล้อมซับซ้อน หรือมีการจัดการหลังฤดูเก็บเกี่ยวด้วยการเผา Random

Forest จะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและให้ความแม่นยำสูง ขณะที่ในพื้นที่เกษตรที่มีการควบคุมหรือใช้ระบบเรือนเพาะชำ หรือมีข้อมูลคุณภาพอากาศสม่ำเสมอ โมเดลเชิงสถิติอาจเพียงพอสำหรับการประเมินเบื้องต้น ดังนั้น การผสมผสานระหว่างแบบจำลอง Machine Learning และแบบจำลองเชิงสถิติ อาจเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเครื่องมือพยากรณ์ PM2.5 เพื่อใช้สนับสนุนการตัดสินใจด้านการวางแผนการเพาะปลูก ปรับปรุงระบบเตือนภัยล่วงหน้า และลดผลกระทบจากฝุ่นละอองต่อผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนในระยะยาว

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะแบบจำลอง Random Forest มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ได้แม่นยำกว่าวิธีการดั้งเดิม เช่น Holt-Winters และ ARIMA รวมถึงแบบจำลอง SVR โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีข้อมูลผันผวนและลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เช่น จังหวัดเชียงใหม่และขอนแก่น Random Forest สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ และแสดงศักยภาพในการตรวจจับรูปแบบข้อมูลที่ซับซ้อนได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ในขณะที่แบบจำลองเชิงสถิติดั้งเดิมยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีในพื้นที่ที่มีข้อมูลต่อเนื่องและแนวโน้มชัดเจน เช่น จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรถาวรและไม่ได้มีพฤติกรรมการณ์เผาในที่โล่งมากนัก จากผลการวิเคราะห์ Feature Importance จากแบบจำลอง Random Forest ยังแสดงให้เห็นว่า ตัวแปรเชิงเวลา เช่น ค่าฝุ่นย้อนหลัง (Lag) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Rolling Mean) มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการทำการเกษตรที่สัมพันธ์กับฤดูกาลและสภาพภูมิอากาศ การนำข้อมูลในอดีตมาใช้ในการประกอบการพยากรณ์จึงมีส่วนสำคัญต่อความแม่นยำของแบบจำลอง

จากผลการศึกษาที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ พบว่าแบบจำลอง Random Forest มีความแม่นยำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์เชิงสถิติดั้งเดิม (Holt-Winters และ ARIMA) และแบบจำลองเชิงเครื่องจักรกลแบบเส้นตรงอย่าง SVR ในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดที่มีพฤติกรรมข้อมูลผันผวนสูง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์เชิงวิชาการและเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อสรุป งานวิจัยควรขยายกรอบการวิเคราะห์เพิ่มเติม ดังนี้

1. ควรเพิ่มการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองขั้นสูงที่เป็นมาตรฐานสากลในงานพยากรณ์ข้อมูลเชิงเวลา เช่น LightGBM และ LSTM ซึ่งมีศักยภาพสูงในการจัดการข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นและข้อมูลที่มีรูปแบบสลับซับซ้อน การเปรียบเทียบเพิ่มเติมจะช่วยให้สามารถยืนยันข้อได้เปรียบหรือข้อจำกัดของ Random Forest อย่างมีน้ำหนักมากขึ้น

2. ควรพิจารณาวิเคราะห์ผลต่างระหว่างการใช้ข้อมูลสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม (เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้น) และข้อมูลที่มีความละเอียดสูง เช่น ข้อมูลรายวันหรือรายชั่วโมง เพื่อประเมินว่าความละเอียดของข้อมูลส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองในระดับใด

3. ควรพัฒนาการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับ Feature Engineering โดยเฉพาะการออกแบบตัวแปรประเภท lag และตัวแปร

ดัชนีเชิงพฤติกรรม เช่น ช่วงฤดูการเผา หรือดัชนีความหนาแน่นของกิจกรรมเกษตรกรรม ซึ่งอาจมีผลต่อความสามารถของแบบจำลองเชิงเรียนรู้ของเครื่องอย่างมีนัยสำคัญ

4. ควรขยายพื้นที่ศึกษาครอบคลุมหลายประเภทของระบบเกษตร เช่น พื้นที่ปลูกพืชไร่ พืชสวน เกษตรแบบเรื้อนเพาะชำ และพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างเชิงพื้นที่ที่มีผลต่อรูปแบบค่าฝุ่นและประสิทธิภาพของแบบจำลองมากน้อยเพียงใด

5. ควรพิจารณาสร้าง Hybrid Model ที่ผสมผสานข้อดีของแบบจำลองทางสถิติเชิงเวลาเข้ากับความสามารถด้านการเรียนรู้ของเครื่อง เช่น ARIMA-LSTM หรือ Holt-Winters ร่วมกับ LightGBM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับโครงสร้างข้อมูลทั้งเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นพร้อมกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของข้อมูล PM2.5 ที่มีทั้งฤดูกาล แนวโน้ม และสัญญาณรบกวนสูง

โดยสรุป การพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ PM2.5 ในงานวิจัยนี้คือการเปรียบเทียบเพิ่มเติมกับแบบจำลองสมัยใหม่ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล รวมถึงการเพิ่มมุมมองด้าน Feature Engineering และการเลือกใช้ข้อมูลความละเอียดสูง เพื่อให้ข้อเสนอเชิงนโยบายและการใช้งานจริงในภาคเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อมมีความน่าเชื่อถือและพร้อมนำไปใช้ได้อย่างแท้จริง ซึ่งแบบจำลอง Random Forest ถือเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการพยากรณ์ค่าฝุ่นละออง PM2.5 ในบริบทของการเกษตรไทย สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อวางแผนเพาะปลูกและจัดการพื้นที่เกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในระดับไร่ นา ระดับชุมชน และระดับนโยบาย โดยมีเป้าหมายสำคัญคือการลดผลกระทบจากมลพิษทางอากาศต่อผลผลิตและสุขภาพแรงงานในภาคเกษตรกรรมอย่างยั่งยืน

References

Gupta, P., Zhan, S., Mishra, V., Aekakkarungroj, A., Markert, A., Pailong, S., & Chishtie, F. (2021). Machine learning algorithm for estimating surface PM2.5 in Thailand. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(11), 210105. doi:10.4209/aaqr.210105.

Duan, M., Sun, Y., Zhang, B., Chen, C., Tan, T., & Zhu, Y. (2023). PM2.5 concentration prediction in six major Chinese urban agglomerations: A comparative study of various machine learning methods based on meteorological data. *Atmosphere*, 14(5), 903. doi: 10.3390/atmos14050903.

Hasnain, A., Hashmi, M. Z., Khan, S., Bhatti, U. A., Min, X., Yue, Y., He, Y., & Wei, G. (2024). Predicting ambient PM2.5 concentrations via time series models in Anhui Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(487). doi: 10.1007/s10661-024-12644-9.

Jiang, C. (2025). Comparative Analysis of ARIMA and Deep Learning Models for Time Series Prediction. *Proceedings*

of the 2nd International Conference on Data Analysis and Machine Learning (DAML 2024) (p306–310). Kuala Lumpur: Science and Technology Publications.

Kontopoulou, V. I., Panagopoulos, A. D., Kakkos, I., & Matsopoulos, G. K. (2023). A review of ARIMA vs. machine learning approaches for time series forecasting in data driven networks. *Future Internet*, 15(8), 255. doi: 10.3390/fi15080255.

Li, X., Li, L., Chen, L., Zhang, T., Xiao, J., & Chen, L. (2022). Random Forest Estimation and Trend Analysis of PM2.5 Concentration over the Huaihai Economic Zone, China (2000–2020). *Sustainability*, 14(14), 8520. doi: 10.3390/SU14148520.

Liu, R., Pang, L., Yang, Y., Gao, Y., Gao, B., Liu, F., & Wang, L. (2023). Air Quality—Meteorology Correlation Modeling Using Random Forest and Neural Network. *Sustainability*, 15(5), 4531. doi: 10.3390/su15054531.

Makhdoomi, A., Sarkhosh, M., & Ziaei, S. (2025). PM2.5 concentration prediction using machine learning algorithms: an approach to virtual monitoring stations. *Scientific Reports*, 15, 14775. doi: 10.1038/s41598-025-92019-3.

Merdani, A. (2024). Comparative machine learning analysis of PM2.5 and PM10 forecasting in Albania. In *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. 1-7. doi: 10.23919/SoftCOM62040.2024.10721971.

Minsan, W., Minsan, P., & Panichkitkosolkul, W. (2024). Enhancing Decomposition and Holt-Winters Weekly Forecasting of PM2.5 Concentrations in Thailand's Eight Northern Provinces Using the Cuckoo Search Algorithm. *Thailand Statistician*, 22(4), 963–985.

Mohammadi, F., Teiri, H., Hajizadeh, Y., Abdollahnejad, A., & Ebrahimi, A. (2024). Prediction of atmospheric PM2.5 level by machine learning techniques in Isfahan Iran. *Scientific Reports*, 14, 2109. doi:10.1038/s41598-024-52617-z.

Pollution Control Department (PCD). (2023). Thailand air quality situation report 2023. Accessed 15 March 2024, Retrieved from <http://www.pcd.go.th>.

Ratchagit, M. (2024). Forecasting PM2.5 concentrations in Chiang Mai using machine learning models. *International Journal on Robotics, Automation and Sciences*, 6(2), 37–41. doi:10.33093/ijoras.2024.6.2.6.

Thai Quality Historical Data Platform. (2024). Historical air quality data and monthly PM2.5 statistics. Accessed 12 March 2024. Retrieved from <https://aqicn.org/historical>.

- Wongoutong, C. (2021). The effect on forecasting accuracy of the Holt–Winters method when using the incorrect model on a non-stationary time series. *Thailand Statistician*, 19(3), 565–582.
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Accessed 10 March 2024, Retrieved from <https://www.who.int/publications/item/9789240034228>.
- Joharestani, M. Z., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., & Talebiesfandarani, S. (2019). PM2.5 prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere*, 10(7), 373. doi: 10.3390/atmos10070373.

Research article

Development of a Forecasting Model for PM2.5 Concentrations Using Machine Learning Techniques: A Case Study in Thailand

Nitaya Buntao¹ Poonsak Sirisom¹ Paramaporn Sangpara¹ Warida palasri¹

Auten Gennaroj³ and Rada Somkhuean^{2*}

¹*Department of Applied Statistics, Faculty of Science and Technology, Mahasarakham Rajabhat University, Mueang District, Maha Sarakham Province, Thailand 44000*

²*Department of Mathematics, Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Mueang District, Chiang Mai Province, Thailand 50300*

³*Chiang Yuen District Public Health Office, Chiang Yuen District, Maha Sarakham Province, Thailand, 44160*

ARTICLE INFO

Article history

Received: 30 July 2025

Revised: 17 October 2025

Accepted: 12 December 2025

Online published: 30 January 2026

Keyword

PM2.5

machine learning

intelligent model

environment

agriculture

ABSTRACT

Fine particulate matter smaller than 2.5 micrometers (PM2.5) poses a persistent threat to public health, environmental quality, and agricultural productivity in Thailand, particularly during the dry season, when concentrations frequently exceed national standards. This study aims to develop a PM2.5 forecasting model by comparing two time-series forecasting approaches—Holt–Winters exponential smoothing and the ARIMA model—with machine learning techniques, namely Random Forest and Support Vector Regression (SVR). Monthly PM2.5 data from Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, and Songkhla for the period 2018–2024 were utilized. The dataset was chronologically divided into an 80% training set and a 20% test set, and model performance was evaluated using the Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE). The findings indicate that the Random Forest model consistently achieved the lowest prediction errors across all provinces, particularly in areas with highly volatile PM2.5 patterns, such as Chiang Mai and Khon Kaen. In contrast, SVR yielded relatively low predictive accuracy. Traditional time-series models performed well in provinces with more stable air quality patterns, such as Songkhla. Lag variables and moving averages were identified as key predictors contributing to model accuracy. Overall, the Random Forest model demonstrates strong potential for application in air quality alert systems and for supporting evidence-based environmental and agricultural policy planning toward long-term sustainability.

*Corresponding author

E-mail address: rada@rmutl.ac.th (R. Somkhuean)

Online print: 30 January 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.1>



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>

บทความวิจัย

ผลของระดับเต้าหู้ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

จิรนนท์ รัตสีวอ¹ จิรายุ มุสิก² สหสา พลนิล³ และ อนุวัฒน์ ศรีสุวรรณ^{4*}

¹สาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

²สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

³สาขาคอมพิวเตอร์ธุรกิจดิจิทัล มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

⁴สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ 33000 ประเทศไทย

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 22 สิงหาคม 2568

แก้ไข: 10 กุมภาพันธ์ 2569

ตอบรับการตีพิมพ์: 30 มีนาคม 2569

ตีพิมพ์ออนไลน์: 27 เมษายน 2569

คำสำคัญ

เต้าหู้

เนื้อเทียมจากพืช

สมบัติทางเคมีกายภาพ

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เนื้อสัมผัส

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระดับการเติมเต้าหู้ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และการประเมินคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสในการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืช โดยใช้เต้าหู้ในปริมาณที่แตกต่างกันต่อสูตร (90 95 100 และ 105 กรัม) จากนั้นตรวจสอบสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัมมีปริมาณความชื้นและค่าออกซิเดชันต่ำสุด แต่มีค่าความแข็งต่ำสุด นอกจากนี้มีปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด (ร้อยละ 46.46 และ 66.90 mg GAE/g db ตามลำดับ) สูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัม มีคะแนนประเมินทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภคสูงสุดในด้านรสชาติและเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาชี้ว่าสูตร 105 กรัม มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณโปรตีน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด และมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคสูงสุด องค์ความรู้จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการประยุกต์ใช้เต้าหู้ที่เหมาะสมในการสร้างผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่มีคุณค่าทางโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกสูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพและมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มมูลค่าแก่พืชตระกูลถั่วและสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือกอย่างยั่งยืน

บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แนวโน้มการบริโภคผลิตภัณฑ์จากพืชแทนเนื้อสัตว์ (Plant-Based Meat; PBM) เพิ่มขึ้นทั้งในประเทศไทยและทั่วโลก อันเนื่องมาจากการตระหนักถึงผลกระทบต่อด้านสุขภาพจากการบริโภคเนื้อสัตว์มากเกินไป ตลอดจนปัจจัยด้านจริยธรรม สิ่งแวดล้อม และแนวคิดความยั่งยืน (Kyriakopoulou et al., 2021) ผลิตภัณฑ์เนื้อจากพืชมักได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่พึงประสงค์ เช่น โปรตีนและใยอาหารสูง ไขมันอิ่มตัวต่ำ และปราศจากคอเลสเตอรอล ซึ่งเชื่อมโยงกับการลดความเสี่ยงของโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) (Friedman & Brandon, 2001) ขณะเดียวกัน PBM ได้เลียนแบบลักษณะของเนื้อสัตว์ในด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส และรสชาติ โดยมีการใช้โปรตีนจากพืชหลากหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ข้าวสาลี ถั่วลันเตา และธัญพืชอื่น ๆ (Kyriakopoulou et al., 2021) โดยเฉพาะถั่วเหลือง ซึ่งจัดเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพที่มีกรดอะมิโนจำเป็นค่อนข้างครบถ้วน มีองค์ประกอบทางโภชนาการสำคัญ เช่น ไอโซฟลาโวน ซาโปนิน เลซิทีน และกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและผลต่อเมแทบอลิซึมไขมัน (Friedman & Brandon, 2001, Messina et al., 2016; Tangkhawanit et al., 2022)

ในการพัฒนาสูตร PBM ปัจจัยเชิงเทคโนโลยีที่กำหนดคุณภาพสำคัญได้แก่ ชนิดและสัดส่วนโปรตีน ชนิดไขมัน วัสดุยึดประสาน สารเพิ่มความหนืด ตลอดจนกระบวนการจัดโครงสร้างการอัดรีดความชื้นสูง เพื่อสร้างโครงสร้างเนื้อเทียมที่เสถียรและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงเนื้อสัตว์ (Jang & Lee, 2024; Kyriakopoulou et al., 2021) ในเชิงสูตร วัสดุยึดประสานมีบทบาทต่อความคงรูป ความฉ่ำ และสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง และความยืดหยุ่น โดยเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวอย่างสารที่ใช้แพร่หลายเพราะเกิดเจลเมื่อให้ความร้อน อย่างไรก็ตามการแสวงหาทางเลือกจากวัตถุดิบธรรมชาติยังมีความจำเป็น (Jang & Lee, 2024; Kyriakopoulou et al., 2021) ซึ่งสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือนจนถึงอุตสาหกรรม เช่น การใช้ผงกลูเตน การใช้หมัก ซึ่งหมักกลูเตนเป็นองค์ประกอบหลักเป็นวัสดุยึดประสานช่วยให้เกิดการยึดเกาะของโครงสร้างเป็นเนื้อเทียมโปรตีนจากพืชได้

เต้าหู้คือผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (tofu) เป็นวัตถุดิบดั้งเดิมในกลุ่มโปรตีนพืชซึ่งมีโครงสร้างเป็นเจลโปรตีนที่มีความชื้นสูงและศักยภาพในการอุ้มน้ำ สามารถหาหน้ำที่เป็นตัวเพิ่มเนื้อสัมผัสได้โดยคุณภาพของเจลเต้าหู้ขึ้นกับองค์ประกอบโปรตีนของถั่วเหลืองและชนิดสารตกตะกอน ซึ่งสัมพันธ์กับความแน่นของโครงข่ายและความแข็งของเจล (Guan et al., 2021; Dang et al., 2023; Jang & Lee,

* Corresponding author

E-mail address: anuwat.s@sskru.ac.th (A. Srisuwan)

Online print: 27 April 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.2>

2024) ยิ่งไปกว่านั้น ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองรวมถึงเต้าหู้ยังเป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิก (เช่น ไอโซฟลาโวนและกรดฟีนอลิก) ซึ่งมีบทบาทด้านออกซิเดชัน สารประกอบฟีนอลิกเป็นกลุ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบอย่างแพร่หลายในพืช โดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวงแหวนอะโรมาติกที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่หรือมากกว่า สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่สำคัญในการปกป้องพืชจากปัจจัยคุกคาม เช่น รังสียูวี จุลินทรีย์ก่อโรค และแมลง (Balasundram et al., 2006) ในด้านโภชนาการและสุขภาพ สารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ลดความเสียหายของเซลล์จากอนุมูลอิสระ จึงช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด เบาหวานชนิดที่ 2 และมะเร็งบางชนิด (Pandey & Rizvi, 2009; Scalbert et al., 2005; Tangkhawanit et al, 2022) นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ และปรับสมดุลจุลินทรีย์ในลำไส้ ซึ่งช่วยเสริมระบบภูมิคุ้มกัน (Dominguez-López et al., 2024) มีงานวิจัยที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชในด้านกระบวนการผลิต การเลือกวัตถุดิบ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยรวม งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการใช้โปรตีนสกัด เช่น โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (Soy protein isolate) โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น หรือตัวกลางการสร้างเนื้อสัมผัส หรือการผสมโปรตีนจากพืชชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มโครงสร้างเส้นใยในเนื้อเทียมและพัฒนาคุณสมบัติทางกลและเคมีของผลิตภัณฑ์ (Ishaq et al., 2022; Zahari et al., 2022) นอกจากนี้การเลือกแหล่งโปรตีนและเทคนิคกระบวนการผลิตมีผลสำคัญต่อการเลียนแบบโครงสร้างและคุณภาพของเนื้อเทียม อย่างไรก็ตามยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้วัตถุดิบโปรตีนที่ไม่ผ่านการสกัดขั้นสูงโดยตรง เช่น เต้าหู้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่ผลิตได้ง่ายในระดับครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก คงโครงสร้างธรรมชาติ มีองค์ประกอบโปรตีนพร้อมใยอาหารสูง มีผลต่อเนื้อสัมผัสและโภชนาการตามธรรมชาติ (Samad, 2025) มีงานวิจัยศึกษาการใช้เต้าหู้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมแบบนักเก็ต ซึ่งพบว่าเต้าหู้

สามารถใช้เป็นฐานในการทดแทนเนื้อสัตว์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพการรับประทานใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเนื้อสัตว์ (Manzanillo & Jr, 2025) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาดังกล่าวมักมุ่งเน้นเฉพาะผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Ready to eat) เช่น นักเก็ตเท่านั้น และไม่ครอบคลุมการ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และโภชนาการของเนื้อเทียมที่พัฒนาด้วยกระบวนการอบแบบง่ายที่สามารถนำไปอุ่นรับประทาน (Ready to heat) ที่ใช้เต้าหู้เป็นฐาน มีโภชนาการที่เหมาะสมสำหรับอาหารพร้อมอุ่นรับประทาน ก่อนหน้าของ Lohasupthawee et al. (2021) ซึ่งใช้สัดส่วนของแหล่งโปรตีนจากพืชร่วมกับวัตถุดิบปรับโครงสร้าง (Structural modifiers) เพื่อเสริมคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสและความสามารถในการกักเก็บน้ำของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม แต่ยังไม่มีการใช้ปริมาณเต้าหู้เป็นฐาน อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับระดับการเติมเต้าหู้ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชยังมีจำกัด มีงานวิจัยโดยในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถเพิ่มความชุ่มชื้นและลดค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เสียสมดุล เพื่อสนับสนุนการพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบที่มีศักยภาพในระดับอุตสาหกรรมขนาดย่อมและระดับครัวเรือน ในการวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลของระดับการเติมเต้าหู้ (90–105 กรัม) ในการทำเนื้อเทียมจากพืช จากนั้นประเมินสมบัติทางกายภาพ ปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด รวมทั้งการประเมินทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้เต้าหู้ และต่อยอดการพัฒนาสูตร PBM เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่สามารถผลิตระดับครัวเรือนได้ต่อไป

Table 1 Plant-based meat formulations with different levels of tofu

Formulation	Tofu (g)	Black Pepper Sauce (g)	Steamed Soybean Residue (g)	Shiitake Seasoning Powder (g)	Water (ml)	Wheat Gluten (g)	Wheat Flour (g)
Plant-based with tofu 90 g.	90	10.5	10.5	3	6	45	45
Plant-based with tofu 95 g.	95	10.5	10.5	3	6	40	45
Plant-based with tofu 100 g.	100	10.5	10.5	3	6	35	45
Plant-based with tofu 105 g.	105	10.5	10.5	3	6	30	45

การเตรียมสูตรผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช

ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชมีสูตรที่ดัดแปลงจาก Lohasupthawee et al. (2021) ดังนี้ แบ่งการผสมเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ส่วนผสมเปียก ส่วนผสมได้แก่ เต้าหู้ (โดยผ่านแปรรูปปริมาณเต้าหู้จำนวน 4 ระดับ คือ 90 95 100 และ 105 กรัมต่อสูตร) ซอสพริกไทยดำ กากถั่วเหลืองนึ่ง ผงปรุงรสเห็ดหอม และ น้ำสะอาด ผสมให้เข้าด้วยกันด้วยเครื่องปั่นโดยใช้ความแรงระดับต่ำ ส่วนที่ 2 นำแป้งหมักไก่ใส่ขามผสม และผสมกับส่วนผสมที่ปั่นลงไป แล้วนวดจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากเข้ากันแล้วค่อย ๆ ใส่แป้งสาลีแล้วนวดต่อจนเป็นเนื้อเดียวกัน (รายละเอียดส่วนผสมแสดงดัง Table 1) ซึ่งเนื้อเทียม 150 กรัมต่อชิ้น ปั่นเนื้อเทียมเป็นก้อน อัดใส่บล็อกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วกดให้แน่นเป็นแผ่นขนาดความหนา 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางบน

แผ่นซิลิโคนสำหรับอบเบเกอรี่ที่ทาน้ำมันพืชบาง ๆ นำไปอบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกลับด้านของเนื้อแล้วอบต่อเป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบเวลาวางไว้ให้เย็นลงและบรรจุแบบสุญญากาศเก็บในตู้เย็นหรืออุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธี Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2000) และ ทาคาเวอร์เตอร์แอคทีวิตี (a_w) โดยใช้เครื่อง water activity วิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำต่อสูตร รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวัดความแข็ง (hardness) ของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (XTplus, Stable Micro Systems, UK) (Lohasupthawee et al., 2021) วัด

ค่าแรงกดโดยใช้หัวกดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร load cell 1 กิโลนิวตัน กดสองครั้ง ที่ความเร็ว 40 มิลลิเมตร/นาที ด้วยระยะการกดร้อยละ 70 ของความสูงตัวอย่าง วิเคราะห์ 8 ซ้ำ/สูตร รายงานเป็นค่าความแข็ง (Hardness)

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยเทคนิคเจลดาทาลวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) (2000) และรายงานเป็นร้อยละ (wb)

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content; TPC)

ทำการวิเคราะห์ ด้วยวิธี Folin–Ciocalteu โดยดัดแปลงจาก Ratseewo et al. (2025) ดังนี้ ชั่งตัวอย่างเนื้อเทียมจากพืช เดิมเอทานอลร้อยละ 80 (v/v) ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อสารทำลาย 1:10 (w/v) เขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองเอาส่วนใสและปั่นเหวี่ยงที่ $1,400 \times g$ นาน 20 นาที เก็บชิ้นสารสกัดส่วนบนไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จนกว่าจะวิเคราะห์ ทำซ้ำ 3 ชุด สำหรับปฏิกิริยา Folin–Ciocalteu เตรียมกราฟมาตรฐานจากสารละลายกรดแกลลิก จากนั้นผสมสารละลายตัวอย่าง 300 ไมโครลิตร กับสารละลาย Folin–Ciocalteu reagent 2.25 ไมโครลิตร เขย่าและพักในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.35 โมลาร์ ปริมาตร 2.25 ไมโครลิตร เขย่าอีกครั้งและพักในที่มืด 90 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หักค่าจาก blank แล้วคำนวณหา TPC จากสมการเส้นมาตรฐานของกรดแกลลิก ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ต่อสูตร รายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัมของตัวอย่างแห้ง (mg GAE/g DW)

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัส

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสโดยมี ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ประเมินด้วย 9-point hedonic scale (1 = ไม่ชอบอย่างยิ่ง ถึง 9 = ชอบอย่างยิ่ง) ในกลุ่มผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 50 คน ประเมิน จัดลำดับการเสิร์ฟแบบสุ่มสมบูรณ์ ลอคคิตจากลำดับตัวอย่าง และเว้นน้ำล้างปากระหว่างตัวอย่าง ตามแนวปฏิบัติมาตรฐานด้านประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์เชิงสถิติ

สำหรับสมบัติทางกายภาพและเคมี ใช้แผนการทดลองสุ่มสมบูรณ์ (CRD) และสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้แผนการทดลองสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) โดยบล็อกเป็นผู้ทดสอบและรอบการ

เสิร์ฟ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และกำกับตัวอักษรแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

ผลิตภัณฑ์ PBM จาก เต้าหู้ หรือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชซึ่งใช้เต้าหู้และกากถั่วเหลือง มีลักษณะปรากฏด้านนอกเหมือนขนมปังแห้ง ลักษณะภายในมีความชุ่มชื้น สีสน้ำตาลอ่อน ถึงน้ำตาลเข้ม เนื้อสัมผัสสม่ำเสมอและมีความแน่นในระดับปานกลางการบรรจุในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม ลักษณะภายนอกเรียบค่อนข้างเนียน มีร่องรอยการกดอัดเล็กน้อยบนผิวผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดจากกระบวนการขึ้นรูปและการซิลบรรจุ แสดงดัง Figure 1



Figure 1 Plant-based protein meat substitute (soy-based tofu)

การเพิ่มระดับการเติมเต้าหู้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืช แสดงดัง Table 2 โดยความชื้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พบว่า สูตรผสมเต้าหู้ 105 กรัม มีปริมาณความชื้นสูงสุด (ร้อยละ 46.63) รองลงมาคือสูตรผสมเต้าหู้ 100 กรัม (ร้อยละ 43.40) สูตรผสมเต้าหู้ 95 กรัม (ร้อยละ 41.08) และต่ำสุดที่สูตรผสมเต้าหู้ 90 กรัม (ร้อยละ 38.12) ความชื้นที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับสมบัติการอุ้มน้ำของเต้าหู้ เนื่องจากโครงสร้างเจลโปรตีนของเต้าหู้สามารถกักเก็บน้ำในช่องว่างของเมทริกซ์โปรตีนได้ดี (Guan et al., 2021) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำรวมเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเติมเต้าหู้ สอดคล้องกับรายงานของ Kyriakopoulou et al. (2021) ที่รายงานว่าโปรตีนพืชในรูปเจลและสารยึดประสานจากธรรมชาติสามารถเพิ่มความชุ่มฉ่ำของเนื้อเทียมจากพืชได้เช่นกัน

Table 2 Physical chemical properties of plant-based meat analogues with different levels of tofu

Samples	Moisture content (%)	a_w	Hardness (g)
Plant-based with soy tofu 90 g	38.12 $\pm$ 1.12 ^d	0.983 $\pm$ 0.001 ^c	140.86 $\pm$ 2.57 ^a
Plant-based with soy tofu 95 g	41.08 $\pm$ 1.00 ^c	0.985 $\pm$ 0.002 ^{bc}	98.82 $\pm$ 2.64 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	43.40 $\pm$ 0.34 ^b	0.987 $\pm$ 0.001 ^{ab}	50.43 $\pm$ 3.47 ^c
Plant-based with soy tofu 105 g	46.63 $\pm$ 0.33 ^a	0.989 $\pm$ 0.001 ^a	21.65 $\pm$ 1.24 ^d

Means in the same column followed by different superscript letters (^{a, b, c, d}) are significantly different ($p < 0.05$).

การวิเคราะห์ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณที่แตกต่างกัน (Table 1) พบว่ามีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.983–0.989 โดยสูตรที่ใช้เต้าหู้ 90 กรัม และ 95 กรัม มีค่า a_w (0.983 และ 0.985 ตามลำดับ) ในขณะที่สูตรที่ใช้เต้าหู้ 100 กรัม มีค่า a_w สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (0.987) และสูตร 105 กรัม มีค่า a_w สูงที่สุด (0.989) ผลการวิเคราะห์

ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปริมาณเต้าหู้ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า a_w ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่า a_w ที่ได้ทั้งหมด (มากกว่า 0.98) มีค่าสูงมากใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โปรตีนสดหรือกึ่งแปรรูป ซึ่งมีศักยภาพในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดี โดยเฉพาะจุลินทรีย์ก่อโรคและจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น *Escherichia coli* *Salmonella*

spp. และ *Staphylococcus aureus* ที่สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีค่า a_w มากกว่า 0.95 (Beuchat, 1981; Rahman, 2007) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 64.38–69.56% ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการเติมเตาหัว เช่นเดียวกับค่า a_w ความชื้นในระดับสูงร่วมกับค่า a_w ที่มากกว่า 0.98 บ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่มีน้ำอิสระพร้อมสำหรับกระบวนการเสื่อมสภาพ ทั้งจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การหืน และการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อโรค (Beuchat, 1981; Rahman, 2007) ความชื้นที่สูงยังสัมพันธ์กับความนุ่ม ฉ่ำ และเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคยอมรับได้ดี แต่ในเชิงความปลอดภัย จำเป็นต้องออกแบบระบบการเก็บรักษาที่เหมาะสม เช่น การแช่เย็น การพาสเจอร์ไรซ์ หรือการบรรจุแบบสุญญากาศ เพื่อยืดอายุผลิตภัณฑ์ให้ปลอดภัยและคงคุณภาพไว้ได้ในระยะยาว นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณเตาหัวในสูตรส่งผลให้ค่า a_w สูงขึ้น จากผลการศึกษา พบว่าการเติมเตาหัวในปริมาณสูงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า a_w ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเตาหัวมีลักษณะเป็นโปรตีนที่เกิดจากการตกตะกอนของน้ำนมถั่วเหลือง ซึ่งมีสมบัติในการกักเก็บน้ำสูง มีการเรียงตัวของโปรตีนที่หลวมและมีรูพรุน ทำให้น้ำที่กักเก็บไว้ในเมทริกซ์ของผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของน้ำอิสระ (*free water*) มากกว่าน้ำที่ถูกยึด (*bound water*) ซึ่งส่งผลให้ค่า a_w สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ถั่วเหลืองในรูปแบบอื่น (Li et al., 2015; Dang et al., 2023) นอกจากนี้ ความสามารถของเตาหัวในการดูดซับน้ำยังส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นรวมสูง แต่เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปที่ไม่ถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงไฟฟ้าสถิตกับโปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต จึงส่งผลให้ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ในระดับสูง แม้จะมีความชื้นสูงก็ตาม (Rahman, 2007)

ค่าความแข็ง (Hardness) ของผลิตภัณฑ์ PBM ที่ใช้เตาหัวในปริมาณแตกต่างกัน (Table 2) อยู่ระหว่าง 21.65–140.86 กรัม โดยพบว่า สูตรที่ใช้เตาหัวถั่วเหลือง 90 กรัม มีค่า hardness สูงที่สุด (140.86) ขณะที่ สูตรที่ใช้เตาหัวถั่วเหลือง 105 กรัม มีค่า hardness ต่ำที่สุด (21.65) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณเตาหัว ส่งผลให้ค่า hardness ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเตาหัวมีโครงสร้างที่อุ้มน้ำได้ดีและประกอบด้วยโปรตีนถั่วเหลืองที่ผ่านการตกตะกอนด้วยน้ำส้มสายชูในรูปแบบเจลหยาบ โครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติช่วยกักเก็บความชื้นและเพิ่มการกระจายตัวของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น (Obatolu, 2008) การที่อนุภาคโปรตีนจากเตาหัวสามารถแทรกตัวในเมทริกซ์โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของผลิตภัณฑ์อาหารและส่งผลต่อ hardness ความยืดหยุ่นของเนื้อสัมผัส มีพื้นฐานจากคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของโปรตีนในเตาหัวเอง โดยงานของ Dang et al. (2023) พบว่าโครงสร้างโปรตีนของเตาหัวมีความหลากหลายของ subunits และองค์ประกอบโครงสร้างที่แตกต่างกัน (เช่น β -sheet และ hydrophobicity) ซึ่งมีผลต่อสมบัติพื้นผิวและการอุ้มน้ำของโปรตีนในผลิตภัณฑ์เตาหัวผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่า การเติมเตาหัวหรือโปรตีนถั่วเหลืองชนิดเจล สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสให้มีความนุ่มและยอมรับได้ดีขึ้นในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมและเบเกอรี่ (Obatolu, 2008; Zhang et al., 2020) แม้ว่าการเติมเตาหัวในปริมาณสูง เช่น 105 กรัม จะช่วยเพิ่มความชุ่มฉ่ำ และความนุ่มของผลิตภัณฑ์ ส่งผลต่อค่า hardness

ที่ต่ำลงและการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น แต่ในบางกรณีอาจส่งผลต่อความสามารถในการรักษารูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อเทียมที่ไม่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงดันหรือแม่พิมพ์แข็ง การมีปริมาณน้ำและไขมันจากเตาหัวสูงเกินไปอาจทำให้โครงสร้างโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในเมทริกซ์ไม่สามารถประสานตัวได้แน่นพอ จึงมีแนวโน้มที่ผลิตภัณฑ์จะเสียรูปร่างได้ง่ายเมื่อผ่านการเก็บรักษาหรือการให้ความร้อนซ้ำ อย่างไรก็ตาม ผลในงานวิจัยนี้แสดงว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัมยังสามารถรักษารูปร่างได้ดีในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากมีการใช้แป้งและกลูเตนร่วมเป็นโครงสร้างเสริม ซึ่งช่วยให้สามารถรักษารูปร่างได้ แม้จะมีความชุ่มชื้นสูง การออกแบบสูตรเนื้อเทียมที่สมดุลระหว่างความนุ่ม และความสามารถในการคงรูปร่างเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคที่ตอบโจทย์ทั้งในด้านการรับประทานและการจัดเก็บในเชิงพาณิชย์

จาก Figure 2 แสดงค่าปริมาณโปรตีน (ร้อยละ) ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากเตาหัว พบว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัม มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (ร้อยละ 46.46) และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากสูตรอื่น รองลงมาคือสูตรที่ใช้เตาหัว 100 กรัม (ร้อยละ 44.93) และ 95 กรัม (ร้อยละ 44.08) ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนสูตรที่ใช้เตาหัว 90 กรัม มีปริมาณโปรตีนต่ำที่สุด (ร้อยละ 38.53) ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่ใช้เตาหัว 105 กรัม ให้ปริมาณโปรตีนสูงที่สุด อธิบายได้จากการที่เตาหัวเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนจากถั่วเหลืองซึ่งมีองค์ประกอบโปรตีนสูง การเพิ่มปริมาณเตาหัวจึงทำให้สัดส่วนโปรตีนในสูตรเพิ่มขึ้นโดยตรง การที่สูตร 90 กรัม มีปริมาณโปรตีนต่ำสุดสอดคล้องกับปริมาณวัตถุดิบโปรตีนที่น้อยกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณเตาหัวที่เติมกับค่าปริมาณโปรตีนโดยรวมในผลิตภัณฑ์ ข้อมูลนี้สอดคล้องกับรายงานของ Messina (2016) ที่ระบุว่าผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง เช่น เตาหัวและโปรตีนถั่วเหลืองแปรรูป เป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง และการเสริมในสูตรอาหารสามารถเพิ่มค่าปริมาณโปรตีนและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในแง่ของคุณสมบัติทางฟังก์ชันของโปรตีน การที่ผลิตภัณฑ์มีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นไม่เพียงแต่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ แต่ยังส่งผลต่อสมบัติด้านโครงสร้างและการกักเก็บน้ำของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลต่อความแข็ง เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค (Kyriakopoulou et al., 2021)

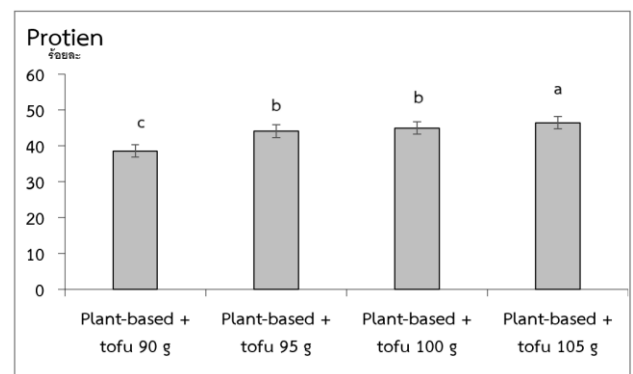


Figure 2 Protein content of plant-based meat analogues with different levels of tofu

โปรตีนจากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนคุณภาพสูง มีรายงานการค้นพบกรดอะมิโนจำเป็นในปริมาณที่เพียงพอตามมาตรฐาน WHO (Friedman & Brandon, 2001) และยังมีสารพฤกษเคมี เช่น ไอโซฟ

ลาโวน ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสี่ยงโรคหัวใจ และปรับสมดุลฮอร์โมน (Messina et al., 2016) การมีปริมาณโปรตีนสูงในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชจึงมีความสำคัญทั้งในแง่การตอบสนองต่อความต้องการทางโภชนาการของผู้บริโภค และการส่งเสริมคุณค่าทางสุขภาพของผลิตภัณฑ์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

จากการวิเคราะห์ปริมาณ TPC ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากพืชที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณต่างกันแสดงดัง Table 3 จากผลการศึกษา

พบว่า ปริมาณ TPC ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมเต้าหู้ในระดับต่าง ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 61.89–66.90 mg GAE/g db ตัวอย่างที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลือง 90 95 และ 100 กรัม มีค่า TPC ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลือง 105 กรัม มีค่า TPC สูงสุดที่ 66.90 mg GAE/g db ซึ่งสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

Table 3 Total Phenolic Content (TPC) of Plant-based meat analogues with different levels of tofu

Sample	TPC (mg GAE/g db)
Plant-based with soy tofu 90 g	62.38 ± 2.45 ^b
Plant-based with soy tofu 95 g	61.89 ± 2.98 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	62.37 ± 2.34 ^b
Plant-based with soy tofu 105 g	66.90 ± 1.85 ^a

Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p < 0.05$)

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของเต้าหู้สามารถส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร TPC ซึ่งอาจมาจากการที่ถั่วเหลืองมีสารประกอบฟีนอลิกและไอโซฟลาโวนอยู่ในปริมาณสูง (Tangkawanit et al., 2022) โดยสารเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในฐานะสารต้านอนุมูลอิสระ แนวโน้มที่ TPC เพิ่มขึ้นตามปริมาณเต้าหู้ที่สูงขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malav et al. (2015) ที่รายงานว่า การเสริมวัตถุดิบจากพืชตระกูลถั่วสามารถเพิ่มศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์เนื้อทางเลือกได้ การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองในสูตรเนื้อเทียมจากพืชมีศักยภาพในการเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติด้านการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาที่สูตร 105 กรัมให้ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) สูงกว่าสูตร 100 กรัมอย่างมีนัยสำคัญ แม้ความแตกต่างของปริมาณเต้าหู้จะเพียง 5 กรัม อาจอธิบายได้จาก ค่าการสะสมของสารฟีนอลิกที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear accumulation) โดยเฉพาะในกรณีที่ปริมาณของวัตถุดิบถึงระดับหนึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการกักเก็บน้ำในระบบมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการสกัดสารฟีนอลิกได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนองานของ Dang et al. (2023) ที่พบว่า โครงสร้างของเต้าหู้ที่หยาบและมีรูพรุนสามารถเก็บสารประกอบชีวภาพในรูปอิสระได้สูงกว่า เมื่อปริมาณเต้าหู้เพิ่มขึ้นถึงระดับ 105 กรัม อาจทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสและความสามารถในการเก็บกักสารฟีนอลิกมีนัยสำคัญมากกว่า 100 กรัม ขณะที่กลุ่ม 90–100 กรัมให้ค่า TPC ใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างทางสถิติ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดเปลี่ยนเชิงปริมาณที่มีผลต่อโครงสร้างหรือความสามารถในการสกัดสารฟีนอลิกอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัส

ผลจากการเติมเต้าหู้ที่ระดับต่างกันต่อการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อเทียมแสดงดัง Table 4 การเปลี่ยนระดับการเติมเต้าหู้ถั่วเหลืองในสูตรเนื้อเทียมจากพืชส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสูตรที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในปริมาณ 105 กรัม ให้คะแนนเฉลี่ยสูงสุดทั้งด้านรสชาติ (7.67 ± 1.64) และความชอบโดยรวม (7.63 ± 1.29) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสูตรที่ใช้เต้าหู้ในปริมาณต่ำกว่า (90–100 กรัม) ที่มีคะแนน

เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.13–6.57 ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองมีผลในเชิงบวกต่อการยอมรับของผู้บริโภค เมื่อพิจารณาคุณภาพทางประสาทสัมผัสในมิติอื่นร่วมด้วย พบว่าระดับการเติมเต้าหู้มีแนวโน้มส่งผลต่อการรับรู้ผ่านประสาทสัมผัสหลายด้าน ในด้านการมองเห็น ผลิตภัณฑ์ที่เติมเต้าหู้ในระดับสูงมีลักษณะปรากฏที่สม่ำเสมอ สีของผลิตภัณฑ์มีความเรียบเนียนและดูชุ่มฉ่ำมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความละเอียดและแน่นสม่ำเสมอ ทั้งนี้ Zhang et al. (2020) รายงานว่าเต้าหู้สามารถช่วยเสริมสร้างโครงสร้างโปรตีนของผลิตภัณฑ์จากพืชให้มีลักษณะใกล้เคียงเนื้อสัตว์ และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของพื้นผิวภายนอกผลิตภัณฑ์ ในด้านกลิ่น การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองมีแนวโน้มช่วยลดกลิ่นถั่วที่ไม่พึงประสงค์ของโปรตีนถั่วเหลือง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยกระบวนการผลิตเต้าหู้ซึ่งประกอบด้วยการให้ความร้อนและการตกตะกอนของโปรตีนสามารถช่วยลดสารประกอบที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเขียว เช่น hexanal และ aldehydes ได้ (Feng et al., 2021; Solina et al., 2005) สำหรับการรับรู้ด้านการสัมผัสและเนื้อสัมผัส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เติมเต้าหู้ถั่วเหลือง 105 กรัม ให้ความรู้สึกในปากที่นุ่ม ชุ่มฉ่ำ และไม่แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางกายภาพที่พบว่าสูตรดังกล่าวมีค่า hardness ต่ำที่สุด (Table 2) แสดงถึงโครงสร้างเนื้อสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นและความเหมาะสมต่อการเคี้ยวและการกลืน อันเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์โปรตีนทางเลือก (Ho et al., 2022) ในด้านรสชาติ การเติมเต้าหู้ในระดับที่เหมาะสมช่วยให้รสชาติของผลิตภัณฑ์มีความกลมกล่อมมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติของเต้าหู้ในการกักเก็บน้ำและไขมัน ทำให้การรับรู้รสชาติรวมมีความสมดุลและนุ่มนวลยิ่งขึ้น (Feng et al., 2021) ดังนั้นผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสชี้ให้เห็นว่าการใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยเฉพาะในระดับ 105 กรัม สามารถช่วยยกระดับคุณภาพของเนื้อเทียมจากพืชในหลายมิติ ทั้งลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับของผู้บริโภคและศักยภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์

Table 4 Sensory Evaluation of Soy protein-based meat analogues with different levels of tofu Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p<0.05$)

Sample	Appearance	Color	Aroma	Taste	Texture	Overall Liking
Plant-based with soy tofu 90 g	6.72 ± 1.45 ^b	6.68 ± 1.40 ^b	6.55 ± 1.38 ^b	6.13 ± 1.62 ^b	6.20 ± 1.50 ^b	6.19 ± 1.46 ^b
Plant-based with soy tofu 95 g	6.80 ± 1.32 ^b	6.75 ± 1.35 ^b	6.62 ± 1.33 ^b	6.28 ± 1.59 ^b	6.35 ± 1.44 ^b	6.26 ± 1.52 ^b
Plant-based with soy tofu 100 g	6.60 ± 1.37 ^b	6.58 ± 1.34 ^b	6.70 ± 1.29 ^b	6.49 ± 1.26 ^b	6.55 ± 1.41 ^b	6.57 ± 1.48 ^b
Plant-based with soy tofu 105 g	6.85 ± 1.28 ^a	6.88 ± 1.30 ^a	7.02 ± 1.25 ^a	7.67 ± 1.64 ^a	7.45 ± 1.33 ^a	7.63 ± 1.29 ^a

Means in the same column followed by different superscript letters (a, b) are significantly different ($p<0.05$)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชโดยใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบหลักในสัดส่วนที่แตกต่างกัน (90 95 100 และ 105 กรัมต่อสูตร) เพื่อตรวจสอบผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพเคมี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเต้าหู้ถั่วเหลืองส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะทางกายภาพดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะสูตรที่มีเต้าหู้ 105 กรัม มีค่าความชื้นและค่า water activity สูงที่สุด แต่มีค่า hardness ต่ำที่สุด แสดงถึงโครงสร้างที่นุ่ม และสามารถกักเก็บน้ำได้ดี ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของผลิตภัณฑ์เนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์ ในด้านคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าสูตรที่ใช้เต้าหู้ 105 กรัมมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด (44.93%) และมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดเช่นกัน (66.90 mg GAE/g db) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แสดงถึงศักยภาพในการเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ สำหรับผลการประเมินทางประสาทสัมผัส ซึ่งครอบคลุมองค์ประกอบทั้ง 5 ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่าสูตรที่มีปริมาณเต้าหู้ 105 กรัม ได้รับคะแนนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญในด้านรสชาติ (7.67 ± 1.64) และความชอบโดยรวม (7.63 ± 1.29) โดยผู้บริโภคให้คะแนนลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติสูงกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังนั้น งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า สูตรที่ใช้เต้าหู้ถั่วเหลืองในระดับ 105 กรัมเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาเนื้อเทียมจากพืชต้นแบบ ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งในด้านคุณค่าทางโภชนาการ สมบัติทางกายภาพ และการยอมรับจากผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงสามารถเป็นพื้นฐานสำคัญในการต่อยอดเชิงพาณิชย์หรือผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพจากพืช ทั้งในระดับครัวเรือน กลุ่มวิสาหกิจชุมชน และอุตสาหกรรมขนาดเล็ก นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง จึงควรใช้ระบบบรรจุแบบสุญญากาศ เก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำกว่า 4 °C (เช่นในตู้เย็น) และบริโภคภายใน 7 วัน งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Shelf-life testing) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการวางแผนผลิตและการตลาด ดังนั้นจึงสามารถต่อยอดจากผลการศึกษาในด้านการศึกษาผลของการแปรรูปอื่นร่วม เช่น การอบแห้ง การพาสเจอร์ไรซ์ หรือการบรรจุแบบควบคุมบรรยากาศต่อคุณภาพของเนื้อเทียมที่พัฒนาขึ้น รวมถึงวิเคราะห์อายุการเก็บรักษาภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน เช่น การแช่เย็น การแช่แข็ง หรืออุณหภูมิห้องเพื่อต่อยอดการผลิตเนื้อเทียมในเชิงพาณิชย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับจัดสรรงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) ประจำปีงบประมาณ

2565 และขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการปฏิบัติการวิจัยครั้งนี้

References

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (17th ed., Vol. 11). Maryland: AOAC International.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99(1), 191-203. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.07.042.
- Beuchat, L. R. (1981). Microbial stability as affected by water activity. *Cereal Foods World*, 26(7), 345-349.
- Dang, Y., Ren, J., Guo, Y., Yang, Q., Liang, J., Li, R., Zhang, R., Yang, P., Gao, X., & Du, S.-K. (2023). Structural, functional properties of protein and characteristics of tofu from small-seeded soybeans grown in the Loess Plateau of China. *Food Chemistry: X*, 18, 100689. doi: 10.1016/j.fochx.2023.100689.
- Dominguez-López, I., Pérez, M., & Lamuela-Raventós, R. M. (2024). Total (poly)phenol analysis by the Folin-Ciocalteu assay as an anti-inflammatory biomarker in biological samples. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(27), 10048–10054. doi: 10.1080/10408398.2023.2220031.
- Feng, Y., Lee, Y., & Chen, T. (2021). Strategies to reduce beany flavor in soy protein-based foods. *Food Reviews International*, 37(5), 495–512. doi: 10.1080/87559129.2019.1652763.
- Friedman, M., & Brandon, D. L. (2001). Nutritional and health benefits of soy proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1069–1086. doi: 10.1021/jf0009246.
- Guan, X., Zhong, X., Lu, Y., Du, X., Jia, R., Li, H., & Zhang, M. (2021). Changes of soybean protein during tofu processing. *Foods*, 10(7), 1594. doi: 10.3390/foods10071594.

- Ishaq, A., Irfan, S., Sameen, A., & Khalid, N. (2022). Plant-based meat analogs: A review with reference to formulation and gastrointestinal fate. *Current Research in Food Science*, 5, 973-983.
- Jang, J., & Lee, D.-W. (2024). Advancements in plant-based meat analogs enhancing sensory and nutritional attributes. *npj Science of Food*, 8, 50. doi: 10.1038/s41538-024-00292-9.
- Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., & van der Goot, A. J. (2021). Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. *Foods*, 10(3), 600. doi: 10.3390/foods10030600.
- Li, T., Rui, X., Wang, K., Jiang, M., Chen, X., Li, W., & Dong, M. (2015). Study of the dynamic states of water and effects of high-pressure homogenization on water distribution in tofu by using low-field nuclear magnetic resonance. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 30, 61-68. doi: 10.1016/j.ifset.2015.03.008.
- Lohasupthawee, P., Damrongmongcolkul, N., Boonpongsa, T., Jewyea, E., & Suklampoo, L. (2021). Effects of wheat flour and royal oyster mushrooms on texture characteristics of meat analogue. *Journal of Science Ladkrabang*, 30(2), 1-11.
- Malav, O. P., Talukder, S., Gokulakrishnan, P., & Chand, S. (2015). Meat analog: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(9), 1241-1245. doi: 10.1080/10408398.2012.689381.
- Manzanillo, R. M., & Jr, R. B. I. (2025). Utilization of Tofu in Nutritional and Sensory Improvement of Plant-Based Nuggets. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(2). 2582-2160.
- Manzanillo, R., & Isidro, R. (2025). Utilization of tofu in nutritional and sensory improvement of plant-based nuggets. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(2). 1-12.
- Messina, M. (2016). Soy and health update: Evaluation of the clinical and epidemiologic literature. *Nutrients*, 8(12), 754. doi: 10.3390/nu8120754.
- Obatolu, V. A. (2008). Effect of different coagulants on yield and quality of tofu from soymilk. *European Food Research and Technology*, 226, 467-472. doi: 10.1007/s00217-006-0558-8.
- Pandey, K. B., & Rizvi, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278. doi: 10.4161/oxim.2.5.9498.
- Rahman, M. S. (2007). *Handbook of food preservation* (2nd ed.). New York: CRC Press.
- Ratseewo, J., Chumroenphat, T., Li, H., & Siriamornpun, S. (2025). Changes in chemical composition, volatile compound, and bioactive compounds retention in shallots (*Allium ascalonicum* L.) under different drying methods. *Food Chemistry: X*, 27, 102419. doi: 10.1016/j.fochx.2025.102419.
- Samad, A., Kim, S.-H., Kim, C.-J., Lee, E.-Y., Kumari, S., Hossain, M. J., Alam, A. N., Muazzam, A., Hwang, Y.-H., & Joo, S.-T. (2025). From farms to labs: The new trend of sustainable meat alternatives. *Food Science of Animal Resources*, 45(1), 13-30. doi: 10.5851/kosfa.2024.e105.
- Scalbert, A., Manach, C., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2005). Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(4), 287-306. doi: 10.1080/1040869059096.
- Solina, M., Baumgartner, P., Johnson, R. L., & Whitfield, F. B. (2005). Volatile aroma components of soy protein isolate and acid-hydrolysed vegetable protein. *Food chemistry*, 90(4), 861-873. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.06.005.
- Zhang, T., Xu, J., Huang, S., Tao, N., Wang, X., & Zhong, J. (2022). Anhydride structures affect the acylation modification and emulsion stabilization ability of mammalian and fish gelatins. *Food chemistry*, 375, 131882. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131882.
- Tangkawanit, E., Meeso, N., & Siriamornpun, S. (2022). Changes in bioactive components, biological activities and starch digestibility of soymilk residues as affected by far-infrared radiation combined with hot-air and hot-air drying. *Drying Technology*, 40(15), 3357-3370. doi: 10.1080/07373937.2022.2030351.
- Zahari, I., Östbring, K., Purhagen, J. K., & Rayner, M. (2022). Plant-based meat analogues from alternative protein: A systematic literature review. *Foods*, 11(18), 2870.
- Zhang, J., Li, M.-M., Zhang, R., Jin, N., Quan, R., Chen, D.-Y., Francis, F., Wang, F.-Z., Kong, Z.-Q., & Fan, B. (2020). Effect of processing on herbicide residues and metabolite formation during traditional Chinese tofu production. *LWT - Food Science and Technology*, 131, 109707. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109707.

Research article

Effects of tofu inclusion level on the physicochemical properties of plant-based meat analogues

Jiranan Ratseewo¹, Jirayu Musika², Sahutsa Ponnil³ and Anuwat Srisuwan^{4*}

¹Division of Food Innovation and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

²Department of Agro-Industry Faculty of Agriculture Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani Province, Thailand 34190

³Digital Business Computer, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

⁴Industrial and Environmental Management Engineering, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province, Thailand 33000

ARTICLE INFO

Article history

Received: 22 August 2025

Revised: 10 February 2026

Accepted: 30 March 2026

Online published: 27 April 2026

Keyword

Tofu

Plant-based meat analog

Physicochemical properties

Total phenolic content

Texture

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effects of varying tofu inclusion levels on the physicochemical and sensory properties of plant-based meat analogs. Tofu was incorporated at different levels (90, 95, 100, and 105 g per formulation), and the resulting products were evaluated for their physicochemical properties, total phenolic content, and sensory quality. The results revealed that the formulation with 105 g of tofu exhibited the highest moisture content and water activity, yet the lowest hardness value. This formulation also had the highest protein and total phenolic contents (46.46% and 66.90 mg GAE/g dry basis, respectively). In terms of sensory attributes, the formulation with 105 g of tofu received the highest consumer scores for taste and texture. These findings suggest that the formulation with 105 g of tofu is the most suitable prototype for further product development due to its high protein and phenolic contents, desirable textural characteristics, and strong consumer acceptance. The knowledge gained from this study highlights the potential of optimizing tofu incorporation to create plant-based meat alternatives that are rich in protein and bioactive compounds. This could contribute to public health and offer opportunities for applications at both household and small-scale industrial levels, thereby enhancing the value of leguminous crops and promoting the sustainable development of alternative protein products.

*Corresponding author

E-mail address: anuwat.s@sskru.ac.th (A. Srisuwan)

Online print: 27 April 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.2>



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>

บทความวิจัย

ผลของความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อการเจริญเติบโตผลผลิต และคุณภาพทางกายภาพของผักสลัด

กิริติ ทองเนตร^{1*} เหล็กไหล จันทะบุตร² วุฒิพล ฉัตรจรัสกุล³ ธวัชชัย สหพงษ์¹ กุลริศา คำสิงห์⁴ และ วรเมธี วรเสริม²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดียและแอนิเมชัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000 ประเทศไทย

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (ประมง) คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000 ประเทศไทย

³สาขาวิชานิติศาสตร์ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000 ประเทศไทย

⁴สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000 ประเทศไทย

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 23 มีนาคม 2569

แก้ไข: 22 เมษายน 2569

ตอบรับการตีพิมพ์: 21 มิถุนายน 2569

ตีพิมพ์ออนไลน์: 29 มิถุนายน 2569

คำสำคัญ

จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง

ผักสลัดกรีนโอ๊ค

มวลชีวภาพ

ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแนวทางการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (Photosynthetic Bacteria: PSB) เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค 2) ศึกษาผลของความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อมวลชีวภาพของผักสลัดกรีนโอ๊ค และ 3) ศึกษาผลกระทบต่อความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุปลูก กลุ่มตัวอย่างคือ ผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 6 ชุดการทดลอง (รวมชุดควบคุม) ชุดละ 3 ซ้ำ โดยทดสอบที่ระดับความเข้มข้น PSB 10 20 30 และ 40 ml ต่อ น้ำ 10 L เปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 และชุดควบคุม (น้ำเปล่า) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ ANOVA และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Multiple Range Test ผลการวิจัยพบว่า 1) จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คได้เทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมี 2) เมื่อสิ้นสุดสัปดาห์ที่ 5 การใช้ปุ๋ยเคมีให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดสูงสุด (59.84 g) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L (58.33 g) และ 3) ด้านความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุปลูก พบว่าการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มข้น 10-30 ml ต่อ น้ำ 10 L สามารถรักษาค่า pH ให้อยู่ในช่วง 6.80-7.00 ซึ่งเหมาะสมต่อการดูดซึมธาตุอาหาร ต่างจากการใช้ปุ๋ยเคมีที่ส่งผลให้ค่า pH ลดลงเหลือ 6.37 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สรุปได้ว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการลดการใช้ปุ๋ยเคมี เนื่องจากสามารถรักษาสสมดุล pH ของวัสดุปลูกและให้ผลผลิตมวลชีวภาพเทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมี

บทนำ

ในปัจจุบัน แนวทางการทำเกษตรกรรมยั่งยืนและการผลิตอาหารปลอดภัยภายใต้โมเดลเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยมุ่งเน้นการลดการใช้ปัจจัยการผลิตที่เป็นสารเคมีสังเคราะห์เพื่อรักษาสมดุลของระบบนิเวศ ปัญหาสำคัญในการผลิตผักสลัดเชิงพาณิชย์คือการพึ่งพาปุ๋ยเคมีในปริมาณสูงเพื่อเร่งอัตราการเจริญเติบโต ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตและโครงสร้างทางกายภาพของดินในระยะยาว นอกจากนี้ การผลิตพืชผักที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์ยังมีแนวโน้มช่วยลดการสะสมของไนโตรเจนในพืชเมื่อเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมี (Luetic et al., 2023)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การประยุกต์ใช้กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ถือเป็นนวัตกรรมสำคัญ โดย Renaud et al. (2023) ได้ให้การยอมรับในระดับสากลว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นทางชีวภาพ (Biostimulants) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหาร

ให้กับพืช สอดคล้องกับการศึกษาของ Kantachote et al. (2010) และ Kantachote et al. (2016) ที่ได้พัฒนาจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังมีหลักฐานความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับพืชชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย โดย Theerak & Phiphoppomphong (2022) แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชในระบบเกษตรอินทรีย์ เช่นเดียวกับ Nimpanich et al. (2025) และ Iversen et al. (2025) ที่ได้ศึกษาผลของการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดและพืชผักในระบบเกษตรอินทรีย์ ซึ่งให้ผลลัพธ์ในทิศทางที่สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับการใช้วัสดุปลูกทั่วไป (Sakpirom et al., 2017)

จากความสำคัญดังกล่าว การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (Photosynthetic Bacteria: PSB) ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตทางกายภาพของผักสลัด

*Corresponding author

E-mail address: keerati.to@rmu.ac.th (K. Tongnate)

Online print: 29 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.3>

กรีนโอ๊ค โดยมุ่งเน้นการศึกษาผลของความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่มีต่อมวลชีวภาพ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุปลูก เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ และพัฒนาระบบการผลิตพืชผักปลอดภัยในระดับชุมชนให้มีความมั่นคงและยั่งยืนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์การวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ดำเนินการ ณ โรงเรือนทดลอง คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2569 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 (อุณหภูมิเฉลี่ย 28–35 °C) พืชที่ใช้ในการทดลองคือผักสลัดกรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa*) ปลูกในกระถางพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว บรรจุวัสดุปลูกแบบซึ่งน้ำหนักสุทธิให้มีความเท่ากันทุกหน่วยทดลอง สารชีวภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบคือจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (Photosynthetic Bacteria: PSB) สายพันธุ์ *Rhodospseudomonas* spp. ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่สะสมกำมะถัน (Purple Non-Sulfur Bacteria: PNSB) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเป็นสารกระตุ้นทางชีวภาพช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชผ่านกระบวนการตรึงไนโตรเจนและปรับปรุงธาตุอาหารในวัสดุปลูก (Theerak et al., 2020)

2. การวางแผนการทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) แบ่งเป็น 6 ชุดการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ รวม 18 หน่วยทดลอง (กระถางละ 1 ต้น) ดังนี้

- T1: ชุดควบคุม (รดน้ำเปล่า)
- T2: ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 1 g ต่อต้น (แบ่งใส่ทุก 15 วัน)
- T3: จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้น 10 ml ต่อต้น 10 L
- T4: จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้น 20 ml ต่อต้น 10 L
- T5: จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้น 30 ml ต่อต้น 10 L
- T6: จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้น 40 ml ต่อต้น 10 L (การรดน้ำจะรดจากยอด ปริมาณ 100 ml ต่อต้น)

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมกล้า: เพาะเมล็ดในวัสดุพีทมอสจนต้นกล้ามีใบจริง 3–4 ใบ หรืออายุประมาณ 15–20 วัน คัดแปลงตามวิธีของ Maynard & Hochmuth (2007) คัดเลือกต้นกล้าที่มีขนาดสมบูรณ์สม่ำเสมอ (Uniform selection) ย้ายปลูกในช่วงเย็นเพื่อลดอัตราการคายน้ำ

3.2 การเตรียมวัสดุปลูก: ใช้ส่วนผสมระหว่าง ดินร่วน: ปุ๋ยคอก: แกลบดำ ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยปริมาตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous mixing) ตามแนวทางระเบียบวิธีของ Gomez & Gomez (1984) และตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นเพื่อใช้เป็นค่าพื้นฐาน (Baseline data) ด้วยเครื่อง pH meter (Model HI98103, Hanna Instruments) ตามเกณฑ์มาตรฐานของ Maynard & Hochmuth (2007)

3.3 การให้จุลินทรีย์และปุ๋ย: เตรียมความเข้มข้นของ PSB ตามระดับที่กำหนดในแต่ละชุดการทดลอง โดยทำการรดทางดิน ปริมาณ 50 มิลลิตรต่อต้น และฉีดพ่นทางใบ (Foliar application) จนเปียกชุ่มในช่วงเช้า (07.00–09.00 น.) ทุก 7 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 5 สัปดาห์

4. การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ผลบันทึกดัชนีการเจริญเติบโตรายสัปดาห์ ได้แก่ ความสูงต้น (วัดจากโคนต้นถึงปลายใบที่ยาวที่สุด) จำนวนใบ ความยาวและความกว้างใบ ดัง Figure 1 เมื่อสิ้นสุดสัปดาห์ที่ 5 ทำการวิเคราะห์มวลชีวภาพ (Biomass) ประกอบด้วยน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง (อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่) รวมถึงวัดค่า pH ของวัสดุปลูกหลังเสร็จสิ้นการทดลอง ข้อมูลทั้งหมดนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)



Figure 1 Data collection of green oak lettuce

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อการเจริญเติบโตทางกายภาพ จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (PSB) ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กับปุ๋ยเคมีสูตร

15-15-15 และชุดควบคุม เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองในสัปดาห์ที่ 5 พบรายละเอียดดัง Table 1

1.1 การเจริญเติบโตในภาพรวมและข้อสังเกตด้านวัสดุปลูก จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าดัชนีชี้วัดการเจริญเติบโตของ

ผักสลัดกรีนโอ๊คในทุกด้าน ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนใบ ความกว้างใบ และความยาวใบ ในทุกชุดการทดลอง (T1–T6) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตทางกายภาพได้เทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมีมาตรฐาน

1.2 ความสูงต้นและจำนวนใบ ผลการศึกษาด้านความสูงต้นพบว่า ชุดการทดลอง T4 (PSB 20 ml ต่อ น้ำ 10 L) มีแนวโน้มให้ค่าเฉลี่ยความสูงสูงสุดที่ 24.67 ± 3.11 cm ซึ่งสูงกว่าชุดที่ใช้ปุ๋ยเคมี T2 (24.08 ± 2.56 cm) เล็กน้อย ในขณะที่ด้านจำนวนใบ พบว่าชุดการทดลอง T6 (PSB 40 ml ต่อ น้ำ 10 L) มีแนวโน้มให้จำนวนใบเฉลี่ยสูงสุดที่ 16.75 ± 0.50 ใบ รองลงมาคือ T4 (15.92 ± 1.24 ใบ) ซึ่งสูง

กว่าการใช้ปุ๋ยเคมี (15.67 ± 0.76 ใบ) ข้อมูลนี้สะท้อนให้เห็นว่าการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงมีแนวโน้มสัมพันธ์เชิงบวกต่อการเพิ่มขนาดโครงสร้างและความหนาแน่นของใบผักสลัด

1.3 ขนาดของใบ (ความกว้างและความยาวใบ) ในด้านความยาวใบ ชุดการทดลอง T4 มีแนวโน้มให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 19.34 ± 0.84 cm ในขณะที่ด้านความกว้างใบ ชุดควบคุม (T1) มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 9.24 ± 0.97 cm ความแปรปรวนของลักษณะสัณฐานวิทยาในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงการปรับตัวของพืชต่อระดับธาตุอาหารและจุลินทรีย์ที่ได้รับ โดยเฉพาะในชุดควบคุมที่ผักสลัดกรีน โอ๊คมีหน้าใบกว้างอาจเป็นผลมาจากกลไกการปรับตัวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับแสงในสภาวะที่จำกัดธาตุอาหารไนโตรเจนมากกว่าชุดที่ได้รับปุ๋ยหรือจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง

Table 1 Effect of Photosynthetic Bacteria (PSB) on physical growth indices of green oak lettuce (Week 5)

Treatment	Plant height (cm)	Number of leaves	Leaf width (cm)	Leaf length (cm)
T1: Control (Water)	23.37 $\pm$ 3.40	14.92 $\pm$ 0.52	9.24 $\pm$ 0.97	18.12 $\pm$ 1.29
T2: Chemical fertilizer (15-15-15)	24.08 $\pm$ 2.56	15.67 $\pm$ 0.76	8.76 $\pm$ 0.38	18.13 $\pm$ 1.54
T3: PSB 10 ml per 10 L of water	21.97 $\pm$ 3.19	15.25 $\pm$ 0.25	8.52 $\pm$ 0.63	18.25 $\pm$ 1.63
T4: PSB 20 ml per 10 L of water	24.67 $\pm$ 3.11	15.92 $\pm$ 1.24	8.82 $\pm$ 0.27	19.34 $\pm$ 0.84
T5: PSB 30 ml per 10 L of water	21.91 $\pm$ 2.96	15.83 $\pm$ 1.01	8.47 $\pm$ 0.43	18.32 $\pm$ 1.74
T6: PSB 40 ml per 10 L of water	20.62 $\pm$ 0.87	16.75 $\pm$ 0.50	8.24 $\pm$ 0.51	17.05 $\pm$ 0.55
F-test	ns	ns	ns	ns
%CV	11.78	4.01	6.00	6.05

Note: ns means there is no statistically significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range test (DMRT)

2. ผลของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงต่อมวลชีวภาพจากการเปรียบเทียบผลผลิตรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (PSB) ในด้านน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ดังนี้ (Table 2)

2.1 การสะสมน้ำหนักสด (Fresh weight) จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยชุดการทดลอง T2 (ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15) ให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดสูงสุดคือ 59.84 ± 0.77 g อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาชุดการทดลอง T4 (PSB 20 ml ต่อ น้ำ 10 L) พบว่าให้ผลผลิตน้ำหนักสด 58.33 ± 1.26 g ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันทางสถิติกับ T2 ผลการทดลองนี้สะท้อนให้เห็นว่าการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อพืชได้เทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ และให้ผลผลิตสูงกว่าชุดควบคุม (T1) อย่างมีนัยสำคัญ

2.2 การสะสมน้ำหนักแห้ง (Dry weight) เมื่อพิจารณาการสะสมน้ำหนักแห้ง พบว่า ชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยชุดการทดลองที่ได้รับจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้นสูง ได้แก่ T5 (30 ml ต่อ น้ำ 10 L) และ T6 (40 ml ต่อ น้ำ 10 L) มีแนวโน้มให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ 8.04 ± 1.30 g และ 8.02 ± 2.13 g ตามลำดับ ซึ่งแม้จะมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (T1) และชุดปุ๋ยเคมีมาตรฐาน (T2 ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15) แต่ยังไม่อยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงในระดับ 30–40 ml ต่อ น้ำ 10 L มีแนวโน้มช่วยให้พืชมีการสะสมมวลชีวภาพ (Biomass accumulation) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ภายในเนื้อเยื่อพืชที่หนาแน่นขึ้น ซึ่งจะส่งผลเชิงบวกต่อการรักษาคุณภาพทางกายภาพ น้ำหนักของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว ตลอดจนความทนทานต่อการเหี่ยวเฉาระหว่างกระบวนการขนส่งเพื่อการจำหน่ายเชิงพาณิชย์

Table 2 Effect of Photosynthetic Bacteria (PSB) on biomass (Fresh weight and dry weight) (Week 5)

Treatment	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
T1: Control (Water)	50.64 $\pm$ 0.53 ^b	7.08 $\pm$ 1.84
T2: Chemical fertilizer (15-15-15)	59.84 $\pm$ 0.77 ^a	7.33 $\pm$ 2.11
T3: PSB 10 ml per 10 L of water	50.48 $\pm$ 0.40 ^b	6.02 $\pm$ 2.66
T4: PSB 20 ml per 10 L of water	58.33 $\pm$ 1.26 ^a	6.44 $\pm$ 1.55
T5: PSB 30 ml per 10 L of water	52.00 $\pm$ 2.65 ^b	8.04 $\pm$ 1.30
T6: PSB 40 ml per 10 L of water	51.73 $\pm$ 0.62 ^b	8.02 $\pm$ 2.13
F-test	*	ns
%CV	2.38	24.51

Note: * means a statistically significant difference at the 0.05 level, ns means there is no statistically significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range test (DMRT)

3. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุปลูกตลอดระยะเวลาทดลอง 5 สัปดาห์ พบว่าในสัปดาห์สุดท้าย (สัปดาห์ที่ 5) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยชุดการทดลอง T1, T3, T4 และ T5 สามารถรักษาค่า pH ให้อยู่ในระดับที่เป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย (6.89-7.00) ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการละลายและการดูดซึมธาตุอาหารส่วนใหญ่ของผักสลัด อย่างไรก็ตาม

พบข้อสังเกตที่สำคัญในชุดการทดลอง T6 (PSB 40 ml ต่อ น้ำ 10 L) ซึ่งค่า pH ลดลงเหลือ 6.37 ± 0.08 และชุด T2 (ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15) ที่ค่า pH ลดลงเหลือ 6.79 ± 0.34 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดที่ใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้นต่ำกว่า การลดลงของค่า pH ในชุดที่ได้รับจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงความเข้มข้นสูงสุดนี้ บ่งชี้ถึงกิจกรรมทางชีวภาพของจุลินทรีย์ที่อาจมีการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาในปริมาณที่สูงเกินความสมดุลของวัสดุปลูก

Table 3 Changes in pH levels in planting media during 5 weeks of experiment

Treatment	pH levels				
	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4	Week 5
T1: Control (Water)	5.00 $\pm$ 0.00	5.47 $\pm$ 0.57	5.58 $\pm$ 0.19 ^{bc}	6.86 $\pm$ 0.14 ^a	7.00 $\pm$ 0.00 ^a
T2: Chemical fertilizer (15-15-15)	5.00 $\pm$ 0.00	5.23 $\pm$ 0.08	5.50 $\pm$ 0.13 ^c	6.93 $\pm$ 0.08 ^a	6.79 $\pm$ 0.34 ^a
T3: PSB 10 ml per 10 L of water	5.00 $\pm$ 0.00	5.25 $\pm$ 0.13	5.65 $\pm$ 0.13 ^{bc}	6.75 $\pm$ 0.20 ^a	6.99 $\pm$ 0.37 ^a
T4: PSB 20 ml per 10 L of water	5.00 $\pm$ 0.00	5.29 $\pm$ 0.08	6.03 $\pm$ 0.14 ^a	6.79 $\pm$ 0.20 ^a	6.89 $\pm$ 0.11 ^a
T5: PSB 30 ml per 10 L of water	5.00 $\pm$ 0.00	5.35 $\pm$ 0.14	5.82 $\pm$ 0.20 ^{ab}	7.00 $\pm$ 0.00 ^a	6.94 $\pm$ 0.05 ^a
T6: PSB 40 ml per 10 L of water	5.00 $\pm$ 0.00	5.30 $\pm$ 0.00	5.70 $\pm$ 0.16 ^{bc}	6.42 $\pm$ 0.24 ^b	6.37 $\pm$ 0.08 ^b
F-test	ns	ns	*	*	*
%CV	-	-	2.65	2.84	3.12

Note: ns means there is no statistically significant difference at the 0.05 level, * means a statistically significant difference at the 0.05 level by Duncan's multiple range test (DMRT)

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (PSB) ต่อผักสลัดกรีนโอ๊ค สรุปได้ว่าการใช้ PSB ที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L (T4) มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตทั้งด้านความสูงจำนวนใบ และการสะสมน้ำหนักรสชาติได้เทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 (T2) โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ในด้านการสะสมมวลชีวภาพ พบว่าการใช้ PSB ความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L (T4) ส่งเสริมการเจริญเติบโตทั้งด้านน้ำหนักสดและความสูงได้เทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมี โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้ชุดการทดลองที่ความเข้มข้นสูง (T5 และ T6) จะมีแนวโน้มผลดีต่อการสะสมน้ำหนักรสชาติ แต่ข้อมูลจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของการเป็นสารกระตุ้นทางชีวภาพ (Biostimulant) ขึ้นอยู่กับการจัดการปริมาณที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อมวัสดุปลูก พบว่าการใช้ PSB ที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L ช่วยรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เป็นกลาง (6.89 – 7.00) ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดต่อการดูดซึมธาตุอาหาร อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ในความเข้มข้นที่สูงเกินสมดุล (T6; 40 ml ต่อ น้ำ 10 L) ส่งผลให้ค่า pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (6.37 ± 0.08) เป็นผลมาจากการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ (Organic acid secretion) ในปริมาณมากจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ ส่งผลกระทบย้อนกลับต่อเสถียรภาพของวัสดุปลูกและลดทอนความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร (Nutrient availability) การจัดการความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงอย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยในการรักษาเสถียรภาพของระบบปลูก จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงมีบทบาทสำคัญในการเป็นสารกระตุ้นทางชีวภาพ ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืช และจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงสายพันธุ์ *Rhodospseudomonas palustris*

มีศักยภาพในการผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตพืช (PGPS) เช่น กรดอินโดล-3-อะซิติก (IAA) และ 5-อะมิโนเลวูลินิกแอซิด (ALA) รวมถึงมีกลไกการตรึงไนโตรเจนผ่านเอนไซม์ไนโตรจีเนส (Nitrogenase) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมีมาตรฐาน

ดังนั้น การใช้ PSB ในอัตราส่วนที่เหมาะสม (20 ml ต่อ น้ำ 10 L) จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับมาตรฐานผลผลิตเกษตรปลอดภัย เพื่อต่อยอดสู่เชิงพาณิชย์และยกระดับความปลอดภัยของผู้บริโภคโดยลดการสะสมสารไนเตรทในผักใบ สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป ควรเพิ่มการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบและค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของวัสดุปลูก รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการใช้ PSB ร่วมกับการลดปริมาณปุ๋ยเคมีในอัตราส่วนต่าง ๆ (Integrated nutrient management) เพื่อหาจุดสมดุลสูงระหว่างการเพิ่มผลผลิตและการลดสารเคมีให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในด้านการนำไปใช้ประโยชน์ เกษตรกรและผู้ประกอบการผักปลอดภัยสามารถประยุกต์ใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (PSB) ที่ระดับความเข้มข้น 20 ml ต่อ น้ำ 10 L เป็นแนวทางสำคัญในการจัดการธาตุอาหารสำหรับผักสลัดกรีนโอ๊ค ซึ่งให้ผลผลิตเทียบเท่ากับการใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 การใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ช่วยรักษาสสมดุลค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในวัสดุปลูกให้อยู่ในระดับที่เป็นกลาง ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารและเสถียรภาพของระบบปลูกในระยะยาว นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ PSB ยังเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับมาตรฐานผลผลิตเกษตรปลอดภัยเพื่อผู้บริโภค เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงจากการสะสมสารไนเตรทในผักใบ แนวทางดังกล่าวถือเป็นการบูรณาการกลยุทธ์ลดการใช้สารเคมีควบคู่กับการจัดการธาตุอาหารอย่างยั่งยืน ที่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการเกษตรกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรเพิ่มการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบและค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของวัสดุปลูก

อย่างละเอียด เพื่อยืนยันความปลอดภัยและคุณค่าทางโภชนาการของผลผลิตตามมาตรฐานเกษตรปลอดภัยในระดับสากล และควรมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงร่วมกับการลดปริมาณปุ๋ยเคมีในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อหาจุดสมดุลระหว่างการเพิ่มผลผลิตและการลดสารเคมีให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และการสนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณรายจ่ายยุทธศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2569 ซึ่งดำเนินการเก็บข้อมูลและทดลองในช่วงระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2569 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีการเกษตร และคณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ห้องปฏิบัติการอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง ตลอดจนขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ ให้ความสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

References

- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Iversen, J., Nimpanich, N., & Prangkratok, T. (2025). Influence of photosynthetic bacteria on growth of Doi KhamChinese kale (*Brassica oleracea* L. Cv. Alboglabra Group). *Proceedings of the 8th King Mongkut's Agricultural Conference* (pp. 247–251). Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Kantachote, D., Kornochalart, N., & Chaiprapat, S. (2010). The use of the purple non sulfur bacterium isolate P1 and fermented pineapple extract to treat latex rubber sheet wastewater for possible use as irrigation water. *African Journal of Microbiology Research*, 4(23), 2604-2616.
- Kantachote, D., Nunkaew, T., Kantha, T., & Chaiprapat, S. (2016).

Biofertilizers from *Rhodopseudomonas palustris* strains to enhance rice yields and reduce methane emissions. *Applied Soil Ecology*, 100, 154-161. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.12.015.

- Luetic, S., Knezovic, Z., Jurcic, K., Majic, Z., Tripkovic, K., & Sutlovic, D. (2023). Leafy vegetable nitrite and nitrate content: potential health effects. *Foods*, 12(8), 1655. doi: 10.3390/foods12081655.
- Maynard, D. N., & Hochmuth, G. J. (2007). *Knott's handbook for vegetable growers* (5th ed.). John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9780470121474.
- Nimpanich, N., Prangkratok, T., & Prommark, P. (2025). Effect of photosynthetic bacteria on growth of red oak lettuce cultivated in an organic farming system. *Journal of Science and Technology Kasetsart University*, 14(2), 26–34. (in Thai)
- Renaud, C., Leys, N., & Wattiez, R. (2023). Photosynthetic microorganisms, an overview of their biostimulant effects on plants and perspectives for space agriculture. *Journal of Plant Interactions*, 18(1). doi:10.1080/17429145.2023.2242697.
- Sakpirom, J., Kantachote, D., Nunkaew, T., & Khan, E. (2017). Characterizations of purple non-sulfur bacteria isolated from paddy fields, and identification of strains with potential for plant growth-promotion, greenhouse gas mitigation and heavy metal bioremediation. *Research in Microbiology*, 168(3), 266–275. doi: 10.1016/j.resmic.2016.12.001.
- Theerak, W., Sumranram, W., & Rattanakaew, T. (2020). Effects of photosynthetic bacteria and bio extract on growth and yield of RD43 rice cultivated in organic systems. *Journal of Agricultural Research and Extension*, 37(2), 25-35. (in Thai)
- Theerak, W., & Phiphoppornphong, P. (2022). Effects of photosynthetic bacteria on growth and yield components of riceberry rice cultivated in organic systems. *RMUTSB Academic Journal*, 10(2), 125–135. (in Thai)

Research article

Effect of Photosynthetic Bacteria Concentration on Growth Yield and Physical Quality of Lettuce

Keerati Tongnate^{1*}, Leklai Chantabut², Vuttipol Chatjaraskul³, Thawatchai Sahapong¹, Kulrisa Khumsing⁴ and Wutmetee Woraserm²

¹*Program in Multimedia Technology and Animation, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Mueang District, Maha Sarakham Province, 44000 Thailand*

²*Program in Agriculture (Fisheries), Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Mueang District, Maha Sarakham Province, 44000 Thailand*

³*Program in Communication Arts, Faculty of Management Science, Rajabhat Maha Sarakham University, Mueang District, Maha Sarakham Province, 44000 Thailand*

⁴*Program in Economics, Faculty of Management Science, Rajabhat Maha Sarakham University, Mueang District, Maha Sarakham Province, 44000 Thailand*

ARTICLE INFO**Article history**

Received: 23 March 2026

Revised: 22 April 2026

Accepted: 21 June 2025

Online published: 29 June 2026

Keyword

Photosynthetic Bacteria

Green oak lettuce

Biomass

pH levels

ABSTRACT

The purposes of this research were: (1) to develop a process for using Photosynthetic Bacteria (PSB) to enhance the growth of green oak lettuce; (2) to study the effects of different PSB concentrations on the biomass of green oak lettuce; and (3) to investigate their impact on the pH of the growing medium. The experimental sample consisted of green oak lettuce grown under a completely randomized design (CRD) with six treatments (including a control group) and three replicates per treatment. PSB concentrations of 10, 20, 30, and 40 cc per 10 L of water were compared with chemical fertilizer (15-15-15) and a control treatment (plain water). Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's Multiple Range Test. The results revealed that: (1) Photosynthetic Bacteria (PSB) promoted the growth of green oak lettuce as effectively as chemical fertilizer; (2) at the end of the fifth week, the chemical fertilizer treatment produced the highest mean fresh weight (59.84 g), which was not significantly different from that obtained with the PSB treatment at a concentration of 20 cc per 10 L (58.33 g); and (3) regarding the pH of the growing medium, the application of PSB treatment at concentrations ranging from 10-30 cc per 10 L maintained pH levels between 6.80 and 7.00, which is optimal for nutrient absorption. In contrast, chemical fertilizer significantly reduced the pH to 6.37 ($p < 0.05$). In conclusion, a PSB concentration of 20 cc per 10 L was the most suitable alternative for reducing chemical fertilizer use, as it maintained the pH balance of the growing medium while providing biomass yields comparable to those achieved with chemical fertilizer.

*Corresponding author

E-mail address: keerati.to@rmu.ac.th (K. Tongnate)

Online print: 29 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.3>



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>

บทความวิจัย

การตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและโลหิตวิทยาในปลาทอง (*Carassius auratus*) ด้วยวัคซีนป้องกันเชื้อ *Aeromonas hydrophila*

พุทธชาติ อิ่มใจ^{1*} บัณฑิตา สวัสดิ์¹ ขนวรรณ ไทวรรณ¹ เหล็กไหล จันทะบุตร¹ และ อรอนงค์ ชันเดช²

¹สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (ประมง) คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000 ประเทศไทย

²สาขาวิชาการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000 ประเทศไทย

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 24 มีนาคม 2569

แก้ไข: 23 เมษายน 2569

ตอบรับการตีพิมพ์: 17 มิถุนายน 2569

ตีพิมพ์ออนไลน์: 29 มิถุนายน 2569

คำสำคัญ

ปลาทอง

แอโรโมแนส ไฮโดรฟิล่า

วัคซีน

การตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน

โลหิตวิทยา

แอนติบอดีไคเตอร์

บทคัดย่อ

การแพร่ระบาดของเชื้อ *Aeromonas hydrophila* ในปลาสวยงามมีเพิ่มขึ้น การพัฒนาวิธีการป้องกันจึงมีความสำคัญ โดยการศึกษาการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและโลหิตวิทยาของวัคซีนป้องกันเชื้อ *A. hydrophila* ในปลาทอง (*Carassius auratus*) ในปลาทอง น้ำหนักเฉลี่ย 47.40 ± 1.95 กรัม แบ่งออกเป็น 5 กลุ่มการทดลอง โดยแบ่งความเข้มข้นของวัคซีนออกเป็น กลุ่มควบคุม (0), 1×10^2 , 1×10^4 , 1×10^6 และ 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปลาทองทุกกลุ่มได้รับวัคซีนที่เตรียมจากเชื้อ *A. hydrophila* พบว่า ที่ความเข้มข้นของวัคซีน 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีอัตราการเจริญเติบโตต่อวันสูงสุด คือ เท่ากับ 0.91 ± 0.04 กรัมต่อวัน และมีค่าปริมาณเม็ดเลือดแดงอัดแน่น (% Hematocrit: Hct) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติของความเข้มข้น และพบว่าค่าแอนติบอดีไคเตอร์ เท่ากับ 3.19 ± 0.06 ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับความเข้มข้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีแอนติบอดีไคเตอร์เท่ากับ 3.22 ± 0.03 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในการทดลอง โดยระดับความเข้มข้นของวัคซีนที่เหมาะสมคือ 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

Introduction

Aquaculture plays a crucial role in global food security and economic development. The swift proliferation of intensive aquaculture systems has heightened the risk of infectious disease outbreaks, especially those induced by bacterial pathogens, which significantly contribute to production losses and economic downturns in the aquaculture sector (FAO, 2020). Goldfish (*Carassius auratus*) is one of the most economically significant ornamental fish, contributing substantially to Thailand's aquaculture industry. It is regarded as a premium export commodity in the ornamental fish industry. Thailand is acknowledged as a leading producer and exporter of ornamental fish globally, especially in Asian, European, and American markets (FAO, 2020; Department of Fisheries, 2021). The ornamental fish industry in Thailand provides revenue for farmers, breeders, and entrepreneurs across

the production chain, encompassing breeding, rearing, transportation, and exportation. Goldfish are immensely popular owing to their many strains and appealing appearance.

Intensive goldfish production methods often encounter bacterial infections that adversely impact survival rates and fish quality. *A. hydrophila* is a prominent bacterial pathogen. This bacterium is a Gram-negative organism belonging to the family Aeromonadaceae, typically located in freshwater habitats (Janda & Abbott, 2010). It is an opportunistic disease that can infect various aquatic species, including goldfish (*C. auratus*) (Harikrishnan et al., 2003). Infections caused by *A. hydrophila* frequently correlate with environmental stresses, notably substandard water quality characterized by organic waste accumulation and abrupt temperature variations. These variables compromise the fish immune system, facilitating

*Corresponding author

E-mail address: puttachat.im@rmu.ac.th (P. Imjai)

Online print: 29 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.4>

pathogen invasion of host tissues and resulting in acute or chronic infections (Zhang et al., 2017).

Aeromonas hydrophila is the etiological agent of motile Aeromonas septicemia (MAS), a serious and highly transmissible bacterial disease in aquaculture systems. Clinical manifestations encompass hemorrhagic lesions on the integument, abdominal distension (ascites), inflammation of fins and gills, septicemia, and anemia (Semwal et al., 2023). The pathogen generates many virulence factors, including as hemolysin, aerolysin, and protease, which lead to host tissue destruction and systemic physiological dysfunction (Akmal et al., 2020; Semwal et al., 2023). This disease has been documented in various fish species, including catfish, common carp, goldfish, and koi carp (Thangaviji et al., 2012). *A. hydrophila* infection poses a significant risk to aquatic animal health and the viability of aquaculture output (Nhin et al., 2021).

Despite the prevalent use of antibiotics for disease management, their misuse can result in antimicrobial resistance and environmental pollution, imposing considerable constraints on contemporary aquaculture systems (Nhin et al., 2021). As a result, vaccination has garnered heightened focus as an efficacious and sustainable approach to disease prevention. Vaccines can activate the fish immune system, namely the humoral immunological response, which can be assessed by measuring antibody titers (Semwal et al., 2023). Vaccination has become an important approach for controlling bacterial diseases caused by *A. hydrophila* in aquaculture. Previous studies demonstrated that vaccines could enhance immune responses and improve survival rates in several fish species, including common carp, Nile tilapia, and zebrafish (Alishahi et al., 2024; Qosimah et al., 2023; Rivas et al., 2023). In ornamental fish, protective immunity against *A. hydrophila* has also been reported in goldfish following vaccination with bacterial antigens (Viji et al., 2013; Rahman et al., 2000). However, information regarding hematological responses and vaccine efficacy in goldfish (*C. auratus*) remains limited. Therefore, further investigation is necessary to support disease prevention and improve health management in ornamental fish culture. This study aims to assess the impact of varying dosages of *A. hydrophila* vaccination

on immunological responses (antibody titer), hematological alterations (hematocrit), and growth performance in goldfish. The results aim to determine an ideal vaccination concentration for efficient and sustainable use in aquaculture systems.

Materials and Methods

Fish Samples and Rearing Conditions

Goldfish (*C. auratus*) were obtained from a local ornamental fish supplier in Mueang District, Maha Sarakham Province, Thailand. The fish exhibited an average body weight of 47.4 ± 1.95 g. Before the experiment, the fish were acclimatized in glass aquaria for one week to facilitate adaptation to laboratory settings. Throughout the acclimatization and experimental phases, the fish were administered a commercial feed (35% crude protein) twice daily (morning and evening) at 3% of their body weight. The experiment was performed in triplicate, and the fish were raised for two weeks under regulated conditions. Water quality measurements, such as pH and temperature, were consistently observed over the trial period.

Vaccine and Antigen Preparation

The vaccination utilized in this investigation was an inactivated (killed) vaccine derived from *A. hydrophila*. The bacterial strain was isolated and cultivated on Brain Heart Infusion Agar (BHIA) and incubated at 25 °C for 24 to 48 hr. (Akmal et al., 2020; Austin & Austin, 2016). A single colony was subsequently injected into 100 ml of Brain Heart Infusion Broth (BHIB) and cultured at 25 °C for 24 hr. to augment bacterial cell density. The bacterial suspension was then collected using centrifugation at 2,500 rpm for 15 min (Harikrishnan et al., 2003). The pellet underwent three washes with sterile 0.85% sodium chloride (NaCl) solution to eliminate contaminants. The bacterial concentration was further modified to 1×10^2 , 1×10^4 , 1×10^6 , and 1×10^8 cells/ml (Thangaviji et al., 2012). The bacteria were rendered inactive using heat treatment at 70 °C for 30 min a conventional technique employed to maintain antigenic structures while eradicating pathogenicity (Semwal et al., 2023; Nayak, 2010). The efficacy of inactivation was validated by re-culturing the treated bacteria on BHIA plates to confirm

the lack of bacterial growth before its application as a vaccination in experimental fish (Akmal et al., 2020).

Immunological Analysis (Antibody Titer Evaluation)

Antibody titers were determined using the direct agglutination method. Serum samples were serially diluted using a two-fold dilution series in 0.85% saline solution. The final volume in each well was adjusted to 50 µl. Subsequently, 50 µl of the prepared antigen was added to each well, resulting in a series of serum dilutions up to 1:2,048. The plates were gently mixed and incubated at 25 °C for 24 hours. Agglutination results were recorded by comparison with a negative control containing only saline solution and antigen. The antibody titer was defined as the highest serum dilution showing visible agglutination. All experimental fish were screened for baseline antibody titers prior to vaccination (Thangaviji et al., 2012; Nayak, 2010).

Vaccination Procedure and Experimental Design

The experimental goldfish were randomly assigned to five treatment groups, each with three replicates and 15 fish per replicate, following a completely randomized design (CRD). All treatment groups received an inactivated *A. hydrophila* vaccine prepared by heat inactivation. Vaccination was administered via intraperitoneal injection at a dose of 1 ml/kg body weight. All fish were maintained under identical environmental and feeding conditions throughout the experimental period. The experimental groups were as follows:

Treatment 1 (Control): non-vaccinated

Treatment 2: vaccinated with 1×10^2 cells/ml

Treatment 3: vaccinated with 1×10^4 cells/ml

Treatment 4: vaccinated with 1×10^6 cells/ml

Treatment 5: vaccinated with 1×10^8 cells/ml

All experimental fish were randomly selected for blood collection to ascertain baseline levels following two weeks of feeding. The initial vaccination (primary vaccination) was subsequently provided. Blood samples were obtained again two weeks after the main vaccination to assess the initial immune response. A booster immunization was delivered three weeks following the original vaccination, or one week after the second blood sampling. Blood samples were taken two weeks post-booster vaccination to evaluate

the immune response subsequent to immunological stimulation.

Throughout the experimental duration, growth performance was assessed by recording body weight at both the commencement and conclusion of the trial. Weight gain was assessed to determine growth performance. The complete trial duration spanned 8 weeks (2 months) under regulated rearing settings.

Hematological Analysis

Hematological parameters of goldfish (*C. auratus*) were evaluated before and after the 2-month experimental period. Ten fish were randomly selected from each treatment group for blood collection. Blood samples were obtained with heparinized syringes to inhibit coagulation during collection (Hrubec et al., 2000). The obtained blood was utilized for hematological analysis, specifically for the estimation of hematocrit (Hct) (Harikrishnan et al., 2003). The microhematocrit method was employed to measure hematocrit. Blood samples were placed into capillary tubes (two tubes per sample) and spun in a hematocrit centrifuge at 11,000 rpm for 5 minutes to segregate red blood cells from plasma (Hrubec et al., 2000). The percentage of packed cell volume (hematocrit) was subsequently measured and documented.

Statistical Analysis

Differences in antibody titers between the first and second sampling points, as well as growth performance among experimental groups, were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) based on a completely randomized design (CRD). Mean comparisons were performed using Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) at a 95% confidence level ($p < 0.05$). All statistical analyses were conducted using SPSS software (version 17.0).

Ethical Approval

All experimental procedures were conducted in accordance with ethical standards for scientific research and the use of animals in research. The study was approved by the relevant institutional authority, and the researcher held a valid Animal Use License for Scientific Purposes (License No. U1045012559, ThaiACUC).

Results and Discussion

Effects of Aeromonas hydrophila Vaccination on Growth Performance in Goldfish

As shown in Table 1, vaccination with *A. hydrophila* significantly influenced the growth performance of *C. auratus*. Fish in all vaccinated groups exhibited higher average daily gain (ADG) compared to the control group ($p < 0.05$). The highest ADG was observed in fish vaccinated with 1×10^6 cells/ml (0.91 ± 0.04 g/day), although this value was not significantly different from those in the 1×10^4 and 1×10^8 cells/ml groups ($p > 0.05$). In contrast, the control group showed the lowest ADG (0.46 ± 0.07 g/day), indicating that vaccination contributed positively to growth performance.

The enhanced growth observed in vaccinated fish may be attributed to improved health status and reduced subclinical infections, which likely facilitated better feed utilization and metabolic efficiency (Uribe et al., 2011). These findings are consistent with previous studies reporting that vaccination can indirectly improve growth by minimizing disease-related stress and enhancing physiological condition. However, increasing the vaccine concentration beyond 1×10^6 cells/ml did not result in further significant improvements in growth. This suggests that excessively high antigen doses may not provide additional benefits and could potentially impose physiological stress. Therefore, 1×10^6 cells/ml appears to be the optimal vaccine concentration for maximizing growth performance in this study.

Table 1 Average Daily Gain (ADG) of *C. auratus* after vaccination against *A. hydrophila*

Concentration	Average Daily Growth (g/day)	
	(ADG)	
	Means $\pm$ SD	
control (0)	0.46 ± 0.07^c	
1×10^2	0.61 ± 0.06^b	
1×10^4	0.81 ± 0.04^a	
1×10^6	0.91 ± 0.04^a	
1×10^8	0.83 ± 0.04^a	

* Means in each column followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$

Hematological Parameters

Hematological parameters, particularly hematocrit (Hct), were assessed prior to and during the experimental period to evaluate the physiological status of goldfish post-vaccination against *A. hydrophila*. Blood samples were obtained from 10 fish per treatment group for a duration of 2 months. The findings indicated that hematocrit levels were not substantially different among treatment groups at both sample intervals (week 3 and week 6) ($p > 0.05$). Nonetheless, minor discrepancies were noted among the therapies. During week 3, the peak hematocrit (Hct) value was noted in fish immunized with 1×10^6 cells/ml ($25.60 \pm 0.52\%$), whereas in week 6, the highest value was obtained in the 1×10^8 cells/ml cohort ($27.00 \pm 1.00\%$) (Table 2). Despite the absence of statistically significant differences, hematocrit values exhibited a tendency to rise from the first to the second sample across all

treatment groups. This tendency may signify an enhancement in physiological condition over time. The elevation in hematocrit aligns with the superior growth performance noted in vaccinated fish, indicating higher oxygen transport capacity and overall metabolic efficiency. Vaccination is an effective strategy for controlling bacterial diseases caused by *A. hydrophila* in aquaculture. Following vaccination, fish immune systems are stimulated through both innate and adaptive immune responses, leading to increased phagocytic activity, cytokine production, and antibody synthesis, particularly immunoglobulin M (IgM) (Ellis, 2001; Uribe et al., 2011). Injectable vaccines have been reported to enhance immune responses, improve hematological parameters such as hematocrit levels, and increase survival rates following bacterial challenge tests (Plant & LaPatra, 2011). Hematocrit serves as a crucial measure of piscine health and signifies

the oxygen transport capability of blood (Clauss et al., 2008). The lack of notable differences among treatments indicates that the immunization did not provoke hematological stress or detrimental physiological effects. Previous research has shown

analogous findings, suggesting that vaccination does not substantially modify hematological parameters but may enhance physiological state and immunological competence (Hrubec et al., 2000; Harikrishnan et al., 2003; Fazio, 2019).

Table 2 Hematocrit of *C. auratus* after vaccination against *A. hydrophila*

Concentration	Hematocrit, Hct % (Means $\pm$ SD)	
	First (weeks 3)	Second (weeks 6)
control (0)	24.76 $\pm$ 0.40 ^a	25.33 $\pm$ 0.76 ^a
1 $\times$ 10 ²	25.00 $\pm$ 0.86 ^a	26.00 $\pm$ 1.00 ^a
1 $\times$ 10 ⁴	25.00 $\pm$ 1.00 ^a	25.83 $\pm$ 1.04 ^a
1 $\times$ 10 ⁶	25.60 $\pm$ 0.52 ^a	26.00 $\pm$ 1.00 ^a
1 $\times$ 10 ⁸	25.33 $\pm$ 0.57 ^a	27.00 $\pm$ 1.00 ^a

* Means followed by the same letters within rows are not significantly different at $p > 0.05$

Table 3 Antibody titer of *C. auratus* after vaccination against *A. hydrophila*

Concentration	Antibody titer (log ₁₀) (Means $\pm$ SD)	
	First (weeks 3)	Second (weeks 6)
control (0)	0.06 $\pm$ 0.00 ^{Ad}	0.09 $\pm$ 0.03 ^{Ad}
1 $\times$ 10 ²	0.63 $\pm$ 0.03 ^{Bc}	2.31 $\pm$ 0.03 ^{Ac}
1 $\times$ 10 ⁴	1.14 $\pm$ 0.06 ^{Bb}	2.69 $\pm$ 0.01 ^{Ab}
1 $\times$ 10 ⁶	1.23 $\pm$ 0.03 ^{Ba}	3.19 $\pm$ 0.06 ^{Aa}
1 $\times$ 10 ⁸	1.29 $\pm$ 0.03 ^{Ba}	3.22 $\pm$ 0.03 ^{Aa}

* Means followed by different lowercase letters within columns and different uppercase letters within rows indicate significant differences at $p < 0.05$.

Antibody Titer Response

The antibody titers of goldfish (*C. auratus*) were assessed utilizing the direct agglutination technique. Baseline antibody levels were evaluated before immunization. Table 3 demonstrates that antibody titers significantly increased in all vaccination groups relative to the control group ($p < 0.05$).

Subsequent to the initial vaccination (week 3), antibody titers exhibited a steady increase correlating

with elevated vaccine concentrations, varying from 0.63 $\pm$ 0.03 to 1.29 $\pm$ 0.03 (log₁₀). Following the booster vaccination at week 6, a significant elevation in antibody titers was noted across all vaccinated cohorts, with values spanning from 2.31 $\pm$ 0.03 to 3.22 $\pm$ 0.03. The peak antibody titers were seen in the 1 $\times$ 10⁶ and 1 $\times$ 10⁸ cells/ml groups, with no statistically significant difference between these treatments ($p > 0.05$) (Figure 1).

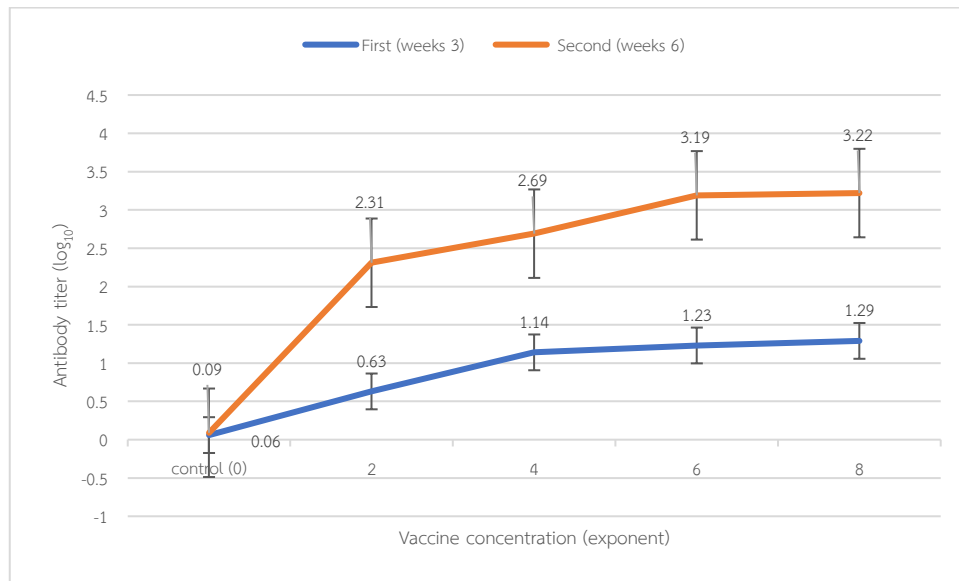


Figure 1 Antibody titer of *C. auratus* after vaccination against *A. hydrophila*

The significant increase in antibody titers from week 3 to week 6 indicates a strong secondary immune response, indicating the formation of immunological memory. This reaction is chiefly facilitated by B lymphocytes, which develop into plasma cells and generate specific antibodies targeting *A. hydrophila*. In teleost fish, immunoglobulin M (IgM) is the primary antibody responsible for humoral immunity, essential for pathogen neutralization and elimination (Magnadóttir, 2006; Uribe et al., 2011).

The increased antibody production noted in this study illustrates the efficacy of the inactivated vaccination in eliciting adaptive immunological responses. The results align with other research indicating that vaccination against *A. hydrophila* markedly elevates antibody levels and enhances illness resistance in goldfish (Semwal et al., 2023; Han et al., 2019; Akmal et al., 2020; Thangaviji et al., 2012). Although the antibody titer in the 1×10^8 cells/ml group was the highest, it was not significantly different from that of the 1×10^6 cells/ml group. The vaccine concentration of 1×10^6 cells/ml seems to be the most suitable for practical application in aquaculture systems, taking into account both immune response and growth performance.

Conclusion

This study demonstrated that vaccination with an inactivated *A. hydrophila* vaccine effectively enhanced the immune response of goldfish (*C. auratus*) without causing adverse effects on hematological parameters. Among the tested concentrations, 1×10^6 cells/ml resulted in the highest growth performance (0.91 ± 0.04 g/day) and induced a strong antibody response comparable to that of the highest concentration (1×10^8 cells/ml). Hematocrit values did not differ significantly among treatments, indicating that the vaccine was physiologically safe for the fish. The stable hematocrit levels may indicate normal blood regulation and the absence of severe stress or adverse effects following vaccination. In contrast, antibody titers increased significantly following booster vaccination, reflecting enhanced adaptive immune response and immunological memory. The results indicate that a vaccination concentration of 1×10^6 cells/ml is ideal for optimizing immunological stimulation and growth performance in goldfish. This concentration is thus advised for practical use in ornamental aquaculture. Although vaccination is an effective strategy for disease prevention, its application in the ornamental fish industry remains limited due to economic constraints.

and labor-intensive administration methods. Future studies should focus on improving vaccine delivery strategies, such as oral or immersion methods, and evaluating the use of adjuvants to enhance vaccine efficacy and practicality.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Program in Agriculture (Fisheries), Faculty of Agricultural Technology, Research and Development Institute, Rajabhat Maha Sarakham University, Thailand, for providing facilities, equipment, and technical support that contributed to the successful completion of this study.

References

- Akmal, M., Rahimi-Midani, A., Hafeez-ur-Rehman, M., Hussain, A., & Choi, T.-J. (2020). Isolation, characterization, and application of a bacteriophage infecting the fish pathogen *Aeromonas hydrophila*. *Pathogens*, 9(3), 215. doi: 10.3390/pathogens9030215.
- Alishahi, M., Lababian, H., Heidari, H., Tabandeh, M. R., & Khosravi, M. (2024). Development of an injectable DNA vaccine against *Aeromonas hydrophila* infection nano encapsulated with poly(lactic-co-glycolic) acid (PLGA) in common carp. *Aquaculture Research*, 1–13. doi: 10.1155/2024/7270489.
- Austin, B., & Austin, D. A. (2007). *Bacterial fish pathogens: Disease of farmed and wild fish*. (4th ed.). Germany: Springer.
- Clauss, T. M., Dove, A. D. M., & Arnold, J. E. (2008). Hematologic disorders of fish. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 11(3), 445–462. doi: 10.1016/j.cvex.2008.03.007
- Department of Fisheries. (2021). *Annual report of Fisheries statistics of Thailand 2021*. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives. Accessed April 24, 2026. Retrieved from https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20221129154933_1_file.pdf (in Thai)
- Ellis, A. E. (2001). Innate host defense mechanisms of fish against viruses and bacteria. *Developmental & Comparative Immunology*, 25(8–9), 827–839. doi: 10.1016/S0145-305X(01)00038-6.
- Han, B., Xu, K., Liu, Z., Ge, W., Shao, S., Li, P., Yan, N., Li, X., & Zhang, Z. (2019). Oral yeast-based DNA vaccine confers effective protection from *Aeromonas hydrophila* infection on *Carassius auratus*. *Fish & Shellfish Immunology*, 84, 948–954. doi: 10.1016/j.fsi.2018.10.065.
- Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2010). The genus *Aeromonas*: taxonomy, pathogenicity, and infection. *Clinical Microbiology Reviews*, 23(1), 35–73. doi: 10.1128/CMR.00039-09
- FAO. (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020*. Sustainability in action. Rome, Italy. doi: 10.4060/ca9229en.
- Fazio, F. (2019). Fish hematology analysis as an important tool of aquaculture: A review. *Aquaculture*, 500, 237–242. doi: 10.1016/j.aquaculture.2018.10.030
- Harikrishnan, R., Rani, M. N., & Balasundaram, C. (2003). Hematological and biochemical parameters in common carp, *Cyprinus carpio*, following herbal treatment for *Aeromonas hydrophila* infection. *Aquaculture*, 221(1–4), 41–50. doi: 10.1016/S0044-8486(03)00023-1.
- Hrubec, T. C., Cardinale, J. L., & Smith, S. A. (2000). Hematology and plasma chemistry reference intervals for cultured tilapia (*Oreochromis* Hybrid). *Veterinary Clinical Pathology*, 29(1), 7–12. doi: 10.1111/j.1939-165X.2000.tb00389.x.
- Magnadóttir, B. (2006). Innate immunity of fish (overview). *Fish & Shellfish Immunology*, 20(2), 137–151. doi: 10.1016/j.fsi.2004.09.006.
- Nayak, S. K. (2010). Role of gastrointestinal microbiota in fish. *Aquaculture Research*, 41(11), 1553–1573. doi: 10.1111/j.1365-2109.2010.02546.x.
- Nhinh, D. T., Le, D. V., Van, K. V., Giang, N. T. H., Dang, L. T., & Hoai, T. D. (2021). Prevalence, virulence gene distribution and alarming the multidrug resistance of *Aeromonas hydrophila* associated with disease outbreaks in freshwater aquaculture. *Antibiotics*, 10(5), 532. doi: 10.3390/antibiotics10050532.
- Plant, K. P., & Lapatra, S. E. (2011). Advances in fish vaccine delivery. *Developmental & Comparative Immunology*, 35(12), 1256–1262. doi: 10.1016/j.dci.2011.03.007.
- Qosimah, D., Santoso, S., Muftuch, M., Khotimah, H., Fitri, L. E., Aulanni'am, A., & Suwanti, L. T. (2023). *Aeromonas hydrophila* induction method in adult zebrafish (*Danio rerio*) as animal infection models. *Veterinary World*, 16(2), 250–257. doi: 10.14202/vetworld.2023.250-257.

- Rahman, M. H., & Kawai, K. (2000). Outer membrane proteins of *Aeromonas hydrophila* induce protective immunity in goldfish. *Fish & Shellfish Immunology*, 10(4), 379–382. doi: 10.1006/fsim.1999.0245.
- Semwal, A., Kumar, A., & Kumar, N. (2023). A review on pathogenicity of *Aeromonas hydrophila* and their mitigation through medicinal herbs in aquaculture. *Heliyon*, 9(3), e114088. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14088
- Thangaviji, V., Michaelbabu, M., Anand, S. B., Gunasekaran, P., & Citarasu, T. (2012). Immunization with the *Aeromonas* OMP provides protection against *Aeromonas hydrophila* in goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 4(2), 45–49. doi: 10.4172/1948-5948.1000070
- Uribe, C., Folch, H., Enríquez, R., & Moran, G. (2011). Innate and adaptive immunity in teleost fish: A review. *Veterinária Medicina*, 56(10), 486–503. doi: 10.17221/3294-VETMED.
- Rivas, A. V., dos Santos, A. G. V., de Souza, A. B., Bueno Junior, G., de Souza, G. F., de Souza, E. M., de Carvalho Nunes, L., & Viana, K. F. (2023). Bivalent Vaccine against *Streptococcus agalactiae* and *Aeromonas hydrophila* in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*): A Laboratory-Phase and Large-Scale Study. *Animals*, 13(21), 3338. doi: 10.3390/ani13213338.
- Viji, V. T., Deepa, K., Velmurugan, S., Donio, M. B. S., Jenifer, J. A., Babu, M. M., & Citarasu, T. (2013). Vaccination strategies to protect goldfish *Carassius auratus* against *Aeromonas hydrophila* infection. *Diseases of Aquatic Organisms*, 104(1), 45–57. doi: 10.3354/dao02581.
- Zhang, D., Xu, D. H., & Shoemaker, C. A. (2017). Immunization with recombinant aerolysin and haemolysin protected channel catfish against virulent *Aeromonas hydrophila*. *Aquaculture Research*, 48(3), 875–882. doi: 10.1111/are.12931.

Research article

Immunological and Hematological Responses of Goldfish (*Carassius auratus*) Following Vaccination Against *Aeromonas hydrophila*

Puttachat Imjai^{1*}, Banthita Sawasdee¹, Chanawan Thowanna¹, Leklai Chantabut¹ and Ananong Khundech²

¹Program in Agriculture (Fisheries), Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Mueang District, Maha Sarakham Province, 44000 Thailand

²Program in Fisheries, Faculty of Agriculture, Sakon Nakhon Rajabhat University, Mueang District, Sakon Nakhon Province, 47000 Thailand

ARTICLE INFO

Article history

Received: 24 March 2026

Revised: 23 April 2026

Accepted: 17 June 2026

Online published: 29 June 2026

Keyword

Goldfish (*Carassius auratus*)

Aeromonas hydrophila

Vaccination

Immunological response

Hematological parameters

Antibody titer

ABSTRACT

Due to the increasing prevalence of *Aeromonas hydrophila* infections in ornamental fish culture, the development of effective preventive strategies has become increasingly important. In this study, a vaccine against *A. hydrophila* was developed and evaluated in goldfish (*Carassius auratus*) with an average body weight of 47.40 ± 1.95 g. The fish were randomly assigned to five experimental groups based on vaccine concentration: control (0), 1×10^2 , 1×10^4 , 1×10^6 , and 1×10^8 cells/ml. All groups, except the control group, received vaccinations derived from *A. hydrophila*. The results indicated that the group inoculated with 1×10^6 cells/ml exhibited the highest specific growth rate, at 0.91 ± 0.04 g/day. Hematocrit (%Hct) values showed no significant differences among the treatment groups ($p > 0.05$). The antibody titer in the 1×10^6 cells/ml group was 3.19 ± 0.06 , which did not differ significantly from that in the 1×10^8 cells/ml group (3.22 ± 0.03), the highest value recorded in this study. Therefore, the optimal vaccine concentration was determined to be 1×10^6 cells/ml.

*Corresponding author

E-mail address: puttachat.im@rmu.ac.th (P. Imjai)

Online print: 29 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.4>



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu/index>

บทความวิจัย

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของข้าวพื้นเมือง (*Oryza sativa* L.) เพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากข้าว

ชัยญรินทร์ สมพร*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด 45120 ประเทศไทย

ข้อมูลบทความ

Article history

รับ: 20 มีนาคม 2569

แก้ไข: 10 มิถุนายน 2569

ตอบรับการตีพิมพ์: 11 มิถุนายน 2569

ตีพิมพ์ออนไลน์: 30 มิถุนายน 2569

คำสำคัญ

พันธุ์ข้าวพื้นเมือง

สารต้านอนุมูลอิสระ

ข้าวกล้องงอกสำเร็จรูป

การอบแห้งแบบโพนเมต

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีมุ่งสำรวจความหลากหลายของพันธุ์ข้าวพื้นเมืองในจังหวัดร้อยเอ็ด ประเทศไทย โดยวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเมทิลเซลลูโลส (เมทเซล) สำหรับการผลิตข้าวกล้องงอกสำเร็จรูป จากการวิเคราะห์ข้าวพื้นเมืองจำนวน 23 สายพันธุ์ พบว่าข้าวเขียวยังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุด (ร้อยละ 76.83) ในขณะที่ข้าวเหนียวหอมภูพานมีปริมาณเส้นใยอาหารสูงที่สุด (ร้อยละ 4.97) ข้าวเก่าใบเขียวมีปริมาณสารฟีนอลิกรวมสูงที่สุด (113.73 มิลลิกรัม GAE ต่อ 100 กรัม) และข้าวเก่าใบเขียวมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด (ร้อยละ 78.40 ของการยับยั้ง DPPH) สำหรับการผลิตข้าวสำเร็จรูป พบว่าความเข้มข้นของเมทเซลที่ร้อยละ 2.00 ให้ค่าเสถียรภาพของโฟม (1.95 มิลลิลิตรต่อนาที) และความสามารถในการคืนรูป (ร้อยละ 92.12) สูงที่สุด โดยผลิตภัณฑ์ที่มีเมทเซลร้อยละ 1.50 และ 2.00 ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับสูง การศึกษานี้พบว่าข้าวพื้นเมือง โดยเฉพาะข้าวเก่าใบเขียวและข้าวเก่าใบเขียว เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเครื่องดื่มเชิงฟังก์ชันจากข้าว ทั้งนี้ ผลการวิจัยสนับสนุนการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพของข้าวพื้นเมืองและการพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มสำหรับตลาดอาหารเพื่อสุขภาพของประเทศไทย

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is a staple food for over half of the world's population and is essential in Asian countries. In Thailand, especially in the Northeastern region including Roi Et Province, rice cultivation is a primary agricultural activity and an important cultural heritage. However, the increasing demand for high-yielding rice varieties has led to a marked reduction in the cultivation and diversity of indigenous rice, posing a risk to genetic diversity and potentially overlooking unique nutritional and bioactive properties. According to the the IRRI (2023) gene bank preserves over 6,321 rice accessions from Thailand and has repatriated more than 7,000 samples to Thailand for genetic research since 1976, but fewer than 100 varieties remain in regular cultivation, with the Northeastern region—including Roi Et—showing one of the steepest declines in indigenous-variety planting area over the past two decades. Recent studies have highlighted the importance of preserving rice biodiversity. Vanlalsanga et al. (2019) demonstrated that indigenous rice varieties possess unique genetic traits crucial for developing climate-resilient

cultivars. Furthermore, Mbanjo et al. (2020) reported that many traditional rice varieties contain higher levels of bioactive compounds than modern high-yielding varieties, suggesting their potential as functional foods.

Indigenous rice varieties, despite their lower yield, offer several advantages over modern varieties, including better adaptation to local environmental conditions and higher content of phytochemicals and antioxidants. Zhang et al. (2010) conducted a comprehensive review of the health benefits of colored rice, reporting strong evidence for its anti-inflammatory, anti-diabetic, and anti-cancer properties. Germination has been found to enhance the nutritional value and bioactive compound content in rice. A recent study by Tsou et al. (2024) demonstrated that germination can increase the γ -aminobutyric acid (GABA) content in rice by up to 70%, suggesting potential applications in functional foods targeting stress reduction and improved sleep quality. These findings indicate the potential of value-added products derived from indigenous rice varieties, which could enhance their economic

*Corresponding author

E-mail address: stchanyarin@gmail.com (C. Somporn)

Online print: 30 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.5>

viability and contribute to their preservation, thereby benefiting local farmers and the Thai rice industry.

One promising avenue for value addition is the development of instant tea products from germinated brown rice. The global instant tea market is expected to grow at a CAGR of 6.2% from 2022 to 2030, with functional and herbal teas being the fastest-growing segment (Zohora et al., 2022). Foam-mat drying, a technique used to produce instant powders, has shown potential for preserving heat-sensitive nutrients and bioactive compounds (Süfer et al., 2024). Recent advancements in this technology, such as the incorporation of natural gums and cellulose derivatives as foaming agents, have further improved its efficiency (Abd El-Salam et al., 2021). However, the optimal processing conditions for producing instant germinated rice tea while preserving its nutritional and functional properties have not been fully explored. Therefore, this study aimed to: (1) investigate the diversity of indigenous rice varieties in Roi Et Province, Thailand, in terms of their nutritional composition; (2) examine the antioxidant capacity and phenolic compound content of these indigenous rice varieties; and (3) determine an appropriate methylcellulose (methocel) concentration for producing instant germinated brown rice tea as a value-added product. The findings provide quantitative data for selecting pigmented indigenous rice varieties as functional-food raw materials, and identify processing conditions that retain bioactive compounds, thereby supporting both biodiversity conservation and the development of rice-based functional beverages.

Materials and methods

Rice varieties and sample preparation

Twenty-three indigenous rice varieties were collected from a comprehensive survey conducted in Roi Et Province, Thailand, encompassing 2,412 villages across 193 subdistricts in 20 districts in November 2023. Paddy rice samples underwent a series of preparation steps: rice grains were soaked in water at a 2:1 ratio (water : grain, by volume) at 30 °C for 6 hr. Soaked samples were incubated at 25 °C with a relative humidity of 75–85% for 24 hr to induce germination. After germination, samples were washed with tap water and oven-dried at 50 °C for 12 hr. Dried rice samples were ground using an ultra-centrifugal mill (ZM 200, Retsch, Germany), and the resulting powder was sieved through a sieving and fractioning machine (AS200-Digit, Retsch, Germany) to obtain rice powder of 60-mesh particle size. The prepared samples were stored in sealable polyamide (PA) plastic bags at 4 °C until further analysis. For

the development of the instant germinated brown rice tea (foam-mat drying experiment), the three pigmented varieties with the highest total phenolic content and DPPH antioxidant activity—Kum Bai Khiaw, Kum Noi, and Hom Nil Pluerk Dum—were selected as raw materials and blended in equal proportions (1:1:1, w/w/w) to produce the test tea base.

Chemical composition analysis

Rice powder samples were subjected to chemical composition analysis following AOAC (2000) methods, with slight modifications as described by Somporn et al. (2011). The parameters assessed included moisture content, determined by oven drying at 105 °C until a constant weight was achieved; ash content, measured using a muffle furnace at 550 °C; crude protein, analyzed via the Kjeldahl method with a conversion factor of 5.95; crude fat, extracted using the Soxhlet method with petroleum ether as the solvent; and dietary fiber, determined using the AOAC (2000) method. Total carbohydrate content was calculated by difference. All analyses were performed in triplicate.

Assessment of antioxidant capacity

DPPH radical scavenging activity

The DPPH radical scavenging activity of rice extracts was determined using the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) method, with butylated hydroxyanisole (BHA) serving as a positive standard. DPPH and BHA (Sigma-Aldrich, USA) were prepared at concentrations of 50, 100, and 200 ppm in methanol. The assay involved mixing 100 µl of the sample solution with 5 ml of 0.1 mM methanolic DPPH solution, followed by vigorous shaking and incubation in the dark at room temperature for 20 min. Absorbance was then measured at 517 nm using a spectrophotometer (Sigma-Aldrich, USA). A control sample, prepared without any extract, was used for comparison, and methanol served as the blank for baseline correction. The radical scavenging activity (% inhibition) was calculated as: % Inhibition = $[(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$, where A_0 is the absorbance of the control and A_1 is the absorbance of the sample.

Determination of total phenolic content

Total phenolic content (TPC) was determined using the Folin–Ciocalteu method. Briefly, 1 ml of appropriately diluted sample or gallic acid standard solution was added to a 25 ml volumetric flask containing 9 ml of distilled water. One ml of Folin–Ciocalteu phenol reagent was then added and mixed. After a 5-min incubation, 10 ml of 7% sodium carbonate solution was introduced, and the mixture was thoroughly mixed. The solution was diluted to 25 ml with distilled water and remixed. After 90 min of incubation at

room temperature, absorbance was measured at 765 nm. Total phenolic content was expressed as milligrams of gallic acid equivalents (GAE) per 100 g of sample.

Production of instant germinated brown rice tea

Preparation of roasted germinated brown rice

Roasted germinated brown rice was prepared following the method of Parnsakhorn & Langkapin (2021). Germinated brown rice was roasted until the grains swelled and developed a fragrant aroma (approximately 5 min). A 33.3 g portion of the roasted rice was soaked in 100 ml of water (1:3, w/v) at 60 °C in a temperature-controlled water bath with intermittent stirring every 10 min for 45 min. The infusion was filtered through white filter cloth and cooled to room temperature before being used as the tea base for the foam-mat drying experiment.

Foam-mat drying process

In the foam-mat drying process, 500 g of roasted germinated brown rice was soaked in 1,500 ml of water and subsequently mixed with methylcellulose (methocel) at concentrations of 1.00%, 1.50%, and 2.00% (w/w). The mixture was blended at maximum speed for 15 min to generate foam. Methocel acts as a surface-active hydrocolloid: its amphiphilic methyl-ether substitutions adsorb at the air–water interface, lowering surface tension and forming a viscoelastic film around air bubbles. This film stabilizes the foam against drainage and coalescence during whipping, and on drying it leaves a porous matrix with greatly increased surface area, which facilitates moisture removal and improves the rehydration behavior of the final powder (Sangamithra et al., 2015). A 150 g portion of the resulting foam was evenly spread onto each drying tray. The foam was dried in a hot-air oven at 50 °C, 60 °C, and 70 °C until a constant moisture level was achieved.

Physical and chemical analysis of instant tea

The physical and chemical properties of the instant tea powder were evaluated as follows. Solids content was assessed both before and after methocel addition. Water activity (a_w , the ratio of the vapor pressure of water in the product to that of pure water at the same temperature) was measured with an Aqualab water-activity meter, and moisture content was determined gravimetrically and expressed on a dry-basis (% d.b.). Solubility, rehydration, and dissolving time were determined following standard procedures, and anthocyanin content was quantified by the pH-differential method. Color was measured with a colorimeter to obtain L^* , a^* , and b^* values. The antioxidant activity of the instant tea was evaluated using the DPPH assay as described above.

Phenolic extraction

For the extraction of phenolic compounds from the instant tea powder, a 50 g sample was mixed with 100 ml of acidified methanol (methanol : acetic acid, 100:1, v/v), blended, and incubated in the dark at 35 °C for 12 hr. The mixture was then filtered and centrifuged at 4,000 rpm, and the supernatant was evaporated at 30–40 °C. The residue was dissolved in 25 ml of an aqueous solvent system (80:20, v/v), filtered through Whatman grade 4 paper and anhydrous sodium sulfate, and evaporated again at 35–40 °C. The extract was reconstituted to 5 ml with a 50:50 (v/v) aqueous solvent and filtered through a 0.45 μ m membrane. The recovered phenolic extract was used for the subsequent total phenolic content (Folin–Ciocalteu) and DPPH assays.

Consumer acceptance evaluation

The consumer acceptance test was conducted by assessing sensory attributes using 50 selected panelists, randomly recruited from the target consumer group. Panelists were 20–60 years old, in good health, with no history of food allergies or other conditions that could affect taste perception, and were interested in consuming health products such as germinated brown rice tea. Each panelist tasted instant germinated brown rice tea prepared by mixing 1 g of tea powder with 10 ml of hot water. Sensory attributes—appearance/color, smell, flavor, and overall liking—were rated on a 9-point hedonic scale (1 = dislike extremely, 9 = like extremely). The study protocol was reviewed and approved by the Institutional Human Research Ethics Committee, and written informed consent was obtained from all participants prior to testing.

Statistical analysis

All experiments were carried out in triplicate. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and mean comparisons were performed using Duncan's multiple-range test at a significance level of $p \leq 0.05$. Statistical analysis was performed using SPSS software version 24 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Results and Discussion

Nutritional composition of indigenous rice varieties

The proximate composition and pericarp color of 23 indigenous rice varieties collected in Roi Et Province, Thailand, are presented in Table 1. Carbohydrate content ranged from 72.50% to 76.83%, with Kiaw Ngu exhibiting the highest value ($76.83 \pm 0.29\%$) and Kum Noi the lowest ($72.50 \pm 0.50\%$). Dietary fiber content varied significantly among the varieties, with Niaw Hom Phu Phan showing the highest fiber content ($4.97 \pm 0.06\%$) and Dok Ma-kham the lowest (2.40

$\pm 0.10\%$). Fat content ranged from 2.03% to 3.43%, with Mali Nil exhibiting the highest fat content ($3.43 \pm 0.12\%$) and Pama Noi the lowest ($2.03 \pm 0.06\%$). Protein content showed less variation, ranging from $0.58 \pm 0.13\%$ to $1.16 \pm 0.14\%$, with Hom Mali Daeng containing the highest protein content ($1.16 \pm 0.14\%$) and Mali Daeng the lowest ($0.58 \pm 0.13\%$).

These results highlight the nutritional diversity among indigenous rice varieties, which is consistent with previous studies. Butsat & Siriamornpun (2010) reported similar ranges of carbohydrate (73.7–76.4%) and fat (2.1–3.1%) content in Thai rice varieties, although their protein values were notably higher (7.6–9.2%). The lower protein

values observed in the present study could be attributed to variations in cultivation practices, soil-nitrogen availability, environmental conditions, varietal genetic background, and differences in analytical methodology. The high dietary fiber content observed in some varieties, particularly Niaw Hom Phu Phan, is noteworthy. Dietary fiber has been associated with various health benefits, including improved digestion, blood glucose regulation, and reduced risk of cardiovascular disease (Lattimer & Haub, 2010). These high-fiber rice varieties could be promoted for their health-promoting properties.

Table 1 Pericarp color and proximate composition (carbohydrate, dietary fiber, fat, and protein) of 23 indigenous rice varieties collected from Roi Et Province, Thailand

Rice variety	Pericarp color	Carbohydrate (%)	Dietary fiber (%)	Fat (%)	Protein (%)
Dok Ma-kham	White	73.53 ± 0.50^{bc}	2.40 ± 0.10^c	3.03 ± 0.06^{ab}	1.09 ± 0.18^{ab}
Hom Baitoei	White	74.67 ± 0.55^b	2.42 ± 0.15^c	3.00 ± 0.01^{ab}	1.05 ± 0.17^{ab}
Hom Nil	Dark purple	75.73 ± 0.31^{ab}	2.57 ± 0.10^c	2.43 ± 0.06^{bc}	0.86 ± 0.13^{bc}
Mali Daeng	Red	76.30 ± 0.26^a	4.40 ± 0.06^a	2.33 ± 0.15^c	0.58 ± 0.13^c
Hom Mali Nil	Dark purple	76.80 ± 0.26^a	4.03 ± 0.12^{ab}	2.30 ± 0.17^c	0.86 ± 0.12^{bc}
Rice Berry	Dark purple	76.67 ± 3.58^a	4.39 ± 0.06^a	2.33 ± 0.58^c	0.99 ± 0.12^b
Niaw Hom Phu Phan	Light brown	75.15 ± 0.61^{ab}	4.97 ± 0.06^a	2.67 ± 0.06^b	0.93 ± 0.15^b
Vessandorn	White	75.20 ± 0.72^{ab}	3.43 ± 0.12^b	2.97 ± 0.06^{ab}	1.05 ± 0.17^{ab}
Kum Noi	Dark purple	72.50 ± 0.50^c	3.07 ± 0.10^{bc}	2.51 ± 0.02^{bc}	0.88 ± 0.14^{bc}
Pama Noi	Red	75.00 ± 1.00^{ab}	4.10 ± 0.06^{ab}	2.03 ± 0.06^d	1.05 ± 0.17^{ab}
Kiaw Ngu	White	76.83 ± 0.29^a	3.27 ± 0.06^{bc}	2.97 ± 0.06^{ab}	1.03 ± 0.17^{ab}
Mali Nil	Dark purple	75.00 ± 1.00^{ab}	3.03 ± 0.06^{bc}	3.43 ± 0.12^a	0.87 ± 0.14^{bc}
Hom Nil Pluerk Dum	Dark purple	73.67 ± 0.58^{bc}	4.03 ± 0.17^{ab}	2.43 ± 0.06^{bc}	0.89 ± 0.13^{bc}
Niaw Daeng	Red	74.63 ± 0.58^b	4.10 ± 0.12^{ab}	2.40 ± 0.17^{bc}	0.90 ± 0.13^b
Kum Bai Khiaw	Dark purple	74.33 ± 0.58^b	4.07 ± 0.10^{ab}	2.33 ± 0.58^c	1.00 ± 0.18^b
Pama	Red	73.33 ± 0.58^{bc}	4.00 ± 0.10^{ab}	3.03 ± 0.06^{ab}	1.06 ± 0.17^{ab}
Kum Namg Paya	Dark purple	74.33 ± 0.58^b	3.10 ± 0.06^{bc}	2.65 ± 0.07^b	0.93 ± 0.15^b
Niaw Kiaw Ngu	White	75.86 ± 0.32^{ab}	3.97 ± 0.13^{ab}	2.44 ± 0.34^{bc}	0.97 ± 0.13^b
Hom Mali Daeng	Red	73.87 ± 0.23^{bc}	3.65 ± 0.50^b	2.77 ± 0.21^b	1.16 ± 0.14^a
Khao Dawk Pa-yawm	White	76.33 ± 0.58^a	4.50 ± 0.20^a	2.97 ± 0.06^{ab}	1.06 ± 0.16^{ab}
Pla Sew	White	74.33 ± 0.58^b	2.90 ± 0.10^{bc}	2.80 ± 0.10^{ab}	1.00 ± 0.16^{ab}
RD6	White	75.33 ± 0.58^{ab}	3.60 ± 0.10^b	2.67 ± 0.13^b	0.97 ± 0.14^b
Niaw Hom	White	75.30 ± 0.58^{ab}	3.43 ± 0.15^b	2.47 ± 0.12^{bc}	0.91 ± 0.14^b

Note: Values are expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD) of three independent experiments, on a dry-weight basis. Pericarp color was recorded visually following standard rice color descriptors. Means within the same column followed by different superscript letters are significantly different at $p \leq 0.05$.

Antioxidant activity and total phenolic content of indigenous rice varieties

The antioxidant activity (measured by DPPH scavenging assay) and total phenolic content (TPC) of the 23 indigenous rice varieties are presented in Table 2. The results reveal substantial variation in both parameters across the varieties. DPPH scavenging activity ranged from 10.50% to 78.40% inhibition, with Kum Noi demonstrating the highest antioxidant activity ($78.40 \pm 1.58\%$) and Khao Dawk Pa-yawm the lowest ($10.50 \pm 0.20\%$). Similarly, TPC varied widely from 9.40 to 113.73 mg GAE/100 g sample, with Kum Bai Khiaw showing the highest TPC (113.73 ± 4.04 mg

GAE/100 g) and Pla Sew the lowest (9.40 ± 2.26 mg GAE/100 g). A strong positive correlation was observed between DPPH scavenging activity and TPC ($p < 0.05$), indicating that phenolic compounds contribute substantially to the antioxidant properties of these rice varieties. This correlation aligns with findings from previous studies on rice and other cereal grains (Gong et al., 2017; Zhang et al., 2010).

Notably, several pigmented rice varieties—Kum Noi, Hom Nil Pluerk Dum, Niaw Daeng, Hom Mali Daeng, and Kum Bai Khiaw—exhibited substantially higher antioxidant activity and TPC than non-pigmented varieties. As shown in Table 1, these varieties have dark-purple or red pericarps. This finding

is consistent with research indicating that pigmented rice varieties, particularly those with dark-purple or red bran, tend to have higher antioxidant content due to the presence of anthocyanins, proanthocyanidins, and other phenolic compounds (Shao et al., 2018). The considerable variation in antioxidant properties among these indigenous varieties highlights their potential as functional food ingredients.

Varieties such as Kum Bai Khiaw and Kum Noi, which combined the highest TPC and antioxidant activity, are particularly suitable candidates for the development of nutraceuticals and functional foods aimed at preventing oxidative-stress-related diseases (Zaupa et al., 2015).

Table 2 Antioxidant activity (DPPH scavenging activity assay) and total phenolic content (TPC) of 23 indigenous rice varieties collected from Roi Et Province, Thailand

Rice variety	DPPH (% inhibition)	TPC (mg GAE/100 g sample)
Dok Ma-kham	16.39±4.26 ^{de}	12.90±0.85 ^{ef}
Hom Baitoei	13.28±2.37 ^e	16.16±1.40 ^{de}
Hom Nil	42.83±2.15 ^c	53.76±3.60 ^c
Mali Daeng	54.21±2.49 ^c	102.13±4.25 ^{ab}
Hom Mali Nil	44.92±1.04 ^c	56.30±3.37 ^c
Rice Berry	55.69±0.93 ^c	84.60±4.49 ^b
Niaw Hom Phu Phan	20.50±0.68 ^d	16.86±2.79 ^{de}
Vessandorn	22.83±0.97 ^d	15.00±1.03 ^{de}
Kum Noi	78.40±1.58 ^a	104.00±4.60 ^{ab}
Pama Noi	23.97±2.87 ^d	18.76±3.04 ^{de}
Kiaw Ngu	23.74±2.00 ^d	25.70±2.51 ^d
Mali Nil	44.92±1.04 ^c	56.30±5.37 ^c
Hom Nil Pluerk Dum	72.87±0.34 ^{ab}	100.73±1.94 ^{ab}
Niaw Daeng	69.88±0.26 ^{ab}	101.50±0.26 ^{ab}
Kum Bai Khiaw	60.39±0.98 ^{ab}	113.73±4.04 ^a
Pama Noi	23.97±2.87 ^d	18.76±3.04 ^{de}
Kiaw Ngu	23.74±2.00 ^d	25.70±2.51 ^d
Mali Nil	44.92±1.04 ^c	56.30±5.37 ^c
Hom Nil Pluerk Dum	72.87±0.34 ^{ab}	100.73±1.94 ^{ab}
Niaw Daeng	69.88±0.26 ^{ab}	101.50±0.26 ^{ab}
Kum Bai Khiaw	60.39±0.98 ^{ab}	113.73±4.04 ^a
Pama	23.76±1.91 ^d	18.76±1.04 ^{de}
Kum Namg Paya	37.43±2.41 ^{cd}	42.63±0.95 ^c
Niaw Kiaw Ngu	20.18±1.22 ^d	16.90±1.45 ^e
Hom Mali Daeng	70.15±2.97 ^{ab}	85.52±3.62 ^b
Khao Dawk Pa-yawm	10.50±0.20 ^e	19.56±4.76 ^d
Pla Sew	18.58±0.80 ^{de}	9.40±2.26 ^f
RD6	27.21±0.07 ^d	19.03±0.61 ^d
Niaw Hom	27.21±0.19 ^d	19.03±0.43 ^d

Note: Values are expressed as mean ± SD of three independent experiments. Means within the same column followed by different superscript letters are significantly different at $p \leq 0.05$.

Physical properties of instant germinated brown rice tea

The physical transformation of the germinated brown rice tea base during the foam-mat drying process is illustrated in Figure 1, which shows three sequential stages of foam development: (a) the initial well-mixed slurry without foam, (b) an unstable, partially collapsed foam, and (c) the final stable foam used as feed for foam-mat drying. The stable foam structure (Figure 1c) demonstrates successful incorporation of methocel as a foaming agent

and is essential for maintaining foam integrity during drying (Raharitsifa & Ratti, 2010). The progression from (a) to (c) confirms that increasing methocel concentration and adequate whipping are necessary to generate the viscoelastic film that supports stable foam, which in turn allows the formation of a porous powder matrix with rapid dissolution potential and a low equilibrium moisture content consistent with extended shelf-life (Kalambe & Guhe, 2026)

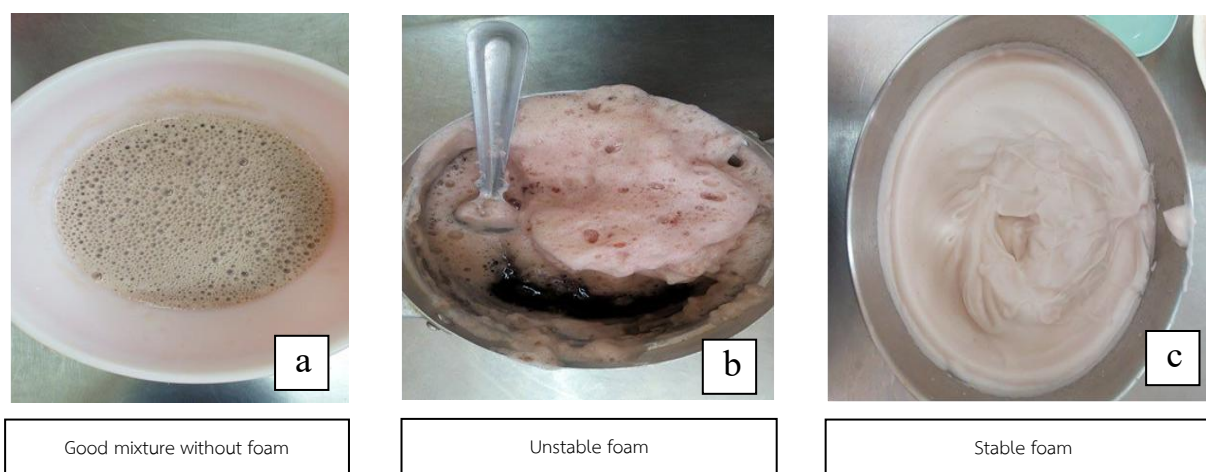


Figure 1 Sequential stages of foam development for foam-mat drying of instant germinated brown rice tea: (a) good mixture without foam, (b) unstable foam, and (c) stable foam used as feed for foam-mat drying

Color measurements of the instant germinated brown rice tea produced through foam-mat drying are presented in Table 3. The results showed minimal changes in color parameters (L^* , a^* , and b^*) between the foam (before drying) and powder (after drying) stages across the three methocel concentrations (1.00%, 1.50%, and 2.00%). This indicates that foam-mat drying effectively preserved the original color of the germinated brown rice base, which is crucial for maintaining the visual appeal of the final product.

Water activity (a_w)—defined as the ratio of the partial vapor pressure of water in the product to that of pure water at the same temperature—and moisture content of the instant tea samples are shown in Table 4. All samples exhibited low a_w (≤ 0.31) and moisture content ($\leq 2.66\%$ d.b.), regardless of methocel concentration. These low values are essential for ensuring product microbiological stability and inhibiting microbial growth during storage (Labuza & Altunakar, 2007). The results suggest that the foam-mat drying process effectively reduced moisture content to levels suitable for long-term storage.

Table 3 Color values of instant germinated brown rice tea through foam-mat drying

Levels of methocel concentration	Before (foam)			After (powder)		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
1.00	86.38±6.26 ^{ns}	2.03±1.56	5.80±1.09	84.61±5.88	4.28±2.32	5.22±0.80
1.50	86.28±6.35	2.05±1.57	5.79±1.16	84.61±5.89	4.28±2.31	5.21±0.81
2.00	86.25±6.36	2.06±1.57	5.86±1.10	84.59±5.88	4.29±2.31	5.22±0.81

Note: The values represent the means of three independent experiments $\pm$ standard deviation (SD).

^{ns}=Means of the color values are not significantly different at $p \leq 0.05$.

Table 4 Water activity (a_w) and humidity of instant germinated brown rice tea through foam-mat drying

Levels of methocel concentration	a_w	Humidity (% d.b.)
1.00	0.31±0.03 ^{ns}	2.11±0.92
1.50	0.30±0.01	2.11±0.92
2.00	0.30±0.02	2.66±0.86

Note: Values represent the means of three independent experiments $\pm$ standard deviation (SD).

^{ns}=Means of the water activity (a_w) and humidity values are not significantly different at $p \leq 0.05$.

The stability, rehydration, and dissolving time of the instant tea samples are presented in Table 5. Foam stability slightly increased with higher methocel concentrations, although the differences were not statistically significant ($p > 0.05$). Rehydration rates were high ($> 92\%$) for all samples, indicating good reconstitution properties. Dissolving time decreased significantly ($p < 0.05$) with

increasing methocel concentration, from 5.06 ± 0.50 min at 1.00% to 3.33 ± 1.20 min at 2.00%. This improvement in dissolving time can be attributed to the enhanced foam structure and the consequent increase in surface area of the porous powder matrix generated at higher methocel concentrations (Karim & Wai, 1999).

Table 5 Stability, rehydration, and dissolving time of instant germinated brown rice tea

Levels of methocel concentration (percentage by weight)	Stability (mL/min)	Rehydration (percentage)	Dissolving (min)
1.00	1.85±1.06 ^{ns}	92.71±7.18 ^{ns}	5.06±0.50 ^a
1.50	1.88±1.08	92.58±7.41	4.28±0.78 ^{ab}
2.00	1.95±1.14	92.12±7.82	3.33±1.20 ^b

Note: Values are expressed as the mean ± standard deviation of three independent experiments.

^{ns}=Means of the stability, rehydration, and dissolving time values are not significantly different at $p \leq 0.05$.

Bioactive compounds and antioxidant activity of instant germinated brown rice tea

The contents of bioactive compounds and antioxidant activity in the instant germinated brown rice tea samples are presented in Table 6. Anthocyanin content remained essentially constant (0.09 µg CGE/g DW) across all three methocel concentrations, with no significant differences among treatments ($p > 0.05$), suggesting that the foam-mat drying process did not adversely affect anthocyanin stability. This stability is consistent with the findings of Goufo & Trindade (2014), who reported that appropriately optimized drying techniques can effectively preserve anthocyanins in plant-based products. Total phenolic content of the instant tea showed only marginal variation across methocel concentrations (2.60–2.64 mg GAE/g DW), and the differences were not statistically

significant ($p > 0.05$). This minimal variation aligns with Carciochi et al. (2016), who demonstrated that optimized drying conditions can minimize the loss of phenolic compounds in thermally processed plant matrices. DPPH antioxidant activity ranged from 29.39% to 31.22% inhibition, with the highest value at 1.00% methocel; differences among the three concentrations were not statistically significant ($p > 0.05$). These values are comparable to those reported by Vichit & Saewan (2015) for various Thai herbal teas, indicating that the instant germinated brown rice tea retains substantial antioxidant capacity. Overall, the choice of methocel concentration within the tested range (1.00–2.00%) did not substantially impact the bioactive profile of the final product, which is advantageous for product formulation and scale-up (Kumar et al., 2022).

Table 6 Content of anthocyanin, phenolic compounds, and antioxidant activity in instant germinated brown rice tea

Levels of methocel concentration	Anthocyanin (µg CGE/g DW)	Total phenolic compounds (mgGAEg/DW)	Antioxidant activity DPPH (% inhibition)
1.00	0.09±0.04 ^{ns}	2.64±0.30 ^{ns}	31.22±2.80 ^{ns}
1.50	0.09±0.03	2.63±0.26	29.39±3.79
2.00	0.09±0.04	2.60±0.27	30.14±1.66

Note: Values represent the mean ± SD of three independent experiments.

Means within the same column followed by different letters indicate statistically significant differences at $p \leq 0.05$.

Sensory evaluation of instant germinated brown rice tea

Consumer sensory evaluation results for the instant germinated brown rice tea are presented in Table 7. Higher methocel concentrations resulted in improved sensory scores across all attributes (color, smell, flavor, and overall liking). The tea produced with 2.00% methocel received the highest scores for color (7.63 ± 1.50) and smell (6.66 ± 1.66), while the 1.50% concentration scored highest for flavor (6.36 ± 2.12) and overall liking (7.03 ± 1.30). Statistical analysis revealed significant differences ($p < 0.05$) between the 1.00% concentration and higher concentrations for most attributes;

however, differences between 1.50% and 2.00% concentrations were generally not significant, except for color. These results suggest that increasing methocel concentration beyond 1.50% does not provide substantial improvements in sensory acceptance. The improved sensory scores at higher methocel concentrations can be attributed to better foam stability during drying, resulting in a more uniform and visually appealing final product, and to the faster dissolving time observed at higher concentrations (Table 5), which likely contributed to improved flavor perception and overall liking.

Table 7 Sensory evaluation of the germinated brown rice tea produced through foam-mat drying

Sense	Concentration		
	1.00	1.50	2.00
Color	5.56±1.89 ^b	6.33±1.82 ^{ab}	7.63±1.50 ^a
Smell	5.23±1.94 ^b	6.36±1.90 ^a	6.66±1.66 ^a
Flavor	5.13±2.08 ^b	6.36±2.12 ^a	6.20±2.00 ^{ab}
Overall linking	5.46±1.90 ^b	7.03±1.30 ^a	7.16±1.34 ^a

Note: Values represent the mean ± SD of three independent experiments.

Means within the same column followed by different letters indicate statistically significant differences at the 0.05 level.

Conclusion

This study characterized 23 indigenous rice varieties from Roi Et Province, Thailand, and demonstrated the feasibility of using foam-mat drying to develop an instant germinated brown rice tea from selected pigmented varieties. Among the varieties screened, the dark-purple pigmented varieties Kum Bai Khiaw (113.73 mg GAE/100 g) and Kum Noi (78.40% DPPH inhibition) showed the highest total phenolic content and antioxidant activity, respectively, making them strong candidates for functional-food applications. Foam-mat drying with methylcellulose (methocel) at 1.50–2.00% produced an instant tea powder with low water activity (≤ 0.31), high rehydration ($> 92\%$), short dissolving time (3.33–4.28 min), retained anthocyanin and phenolic content, and the highest consumer sensory acceptance. These findings indicate that integrating indigenous-rice varietal selection with foam-mat drying is a practical pathway for converting under-utilized local rice biodiversity into market-ready functional beverages. Future work should: (1) quantify and identify individual phenolic compounds in the most promising pigmented varieties by HPLC–DAD or LC–MS to provide chemical fingerprints; (2) evaluate storage stability (color, anthocyanins, phenolics, antioxidant activity) of the instant tea powder under different packaging and temperature conditions for at least six months; (3) assess *in vitro* and *in vivo* bioavailability of the bioactive compounds, including GABA, after rehydration; and (4) scale up the process to pilot-plant level and conduct a techno-economic analysis to support commercialization with smallholder rice farmers in Roi Et Province.

Acknowledgements

This research was supported by grant No. 165535 from Roi Et Rajabhat University, Thailand. The authors also thank Mahasarakham University, Thailand for laboratory and technician support.

References

- Abd El-Salam, E. A. E., Ali, A. M., & Hammad, K. S. (2021). Foaming process optimization, drying kinetics, and quality of foam mat dried papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1449-1461. doi: 10.1007/s13197-020-04657-2.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official Methods of Analysis*. (17th ed). Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- Butsat, S., & Siriamornpun, S. (2010). Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. *Food Chemistry*, 119(2), 606-613. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.07.001.
- Carciochi, R. A., Galván-D'Alessandro, L., Vandendriessche, P., & Chollet, S. (2016). Effect of germination and fermentation process on the antioxidant compounds of quinoa seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(4), 361-367. doi: 10.1007/s11130-016-0567-0.
- Gong, E. S., Luo, S., Li, T., Liu, C., Zhang, G., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, R. H. (2017). Phytochemical profiles and antioxidant activity of processed brown rice products. *Food Chemistry*, 232, 67-78. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.148.
- Goufo, P., & Trindade, H. (2014). Rice antioxidants: Phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid. *Food Science & Nutrition*, 2(2), 75-104. doi: 10.1002/fsn3.86.
- International Rice Research Institute (IRRI). (2023). *Thailand Rice Department and IRRI ink 2023-2027 Joint Work Plan*. Accessed March 20, 2026. Retrieved from <https://www.irri.org/news-and>

- events/news/thailand-rice-department-and-irri-ink-2023-2027-joint-work-plan.
- Karim, A. A., & Wai, C. C. (1999). Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée. Stability and airdrying characteristics. *Food Chemistry*, 64(3), 337-343.
- Kalambe, S. & Guhe, S. (2026). Foam mat drying of perishable products: a critical review of process parameters, product quality, and sustainable prospects. *Sustainable Food Technology*, 4, 133–152. doi: 10.1039/D5FB00203F.
- Kumar, G., Kumar, N., Prabhakar, P. K., & Kishore, A. (2022). Foam mat drying: Recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(26), 8275–8291. doi: 10.1080/10408398.2022.2053061.
- Labuza, T. P., & Altunakar, L. (2007). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana Jr., S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water activity in foods: Fundamentals and applications* (pp. 109-154). Blackwell Publishing. doi: 10.1002/9780470376454.
- Lattimer, J. M., & Haub, M. D. (2010). Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients*, 2(12), 1266–1289. doi: 10.3390/nu2121266
- Mbanjo, E. G. N., Kretzschmar, T., Jones, H., Ereful, N., Blanchard, C., Boyd, L. A., & Sreenivasulu, N. (2020). The genetic basis and nutritional benefits of pigmented rice grain. *Frontiers in Genetics*, 11, 229. doi: 10.3389/fgene.2020.00229
- Parnsakhorn, S. & Langkapin, J. (2021). Effects of processing and heating on antioxidant activity and quality of riceberry malted beverage. *Thai Science and Technology Journal*. 29(1), 119-133. (in Thai)
- Raharitsifa, N., & Ratti, C. (2010). Foam-mat freeze-drying of apple juice part 1: Experimental data and ANN simulations. *Journal of Food Process Engineering*, 33(1), 268-283. doi: 10.1111/j.1745-4530.2009.00400.x
- Sangamithra, A., Venkatachalam, S., John, S. G., & Kuppaswamy, K. (2015). Foam mat drying of food materials: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3165–3174. doi: 10.1111/jfpp.12421.
- Shao, Y., Hu, Z., Yu, Y., Mou, R., Zhu, Z., & Beta, T. (2018). Phenolic acids, anthocyanins, proanthocyanidins, antioxidant activity, minerals and their correlations in non-pigmented, red, and black rice. *Food Chemistry*, 239, 733-741. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.07.009.
- Somporn, C., Kamtuo, A., Theerakulpisut, P., & Siriamornpun, S. (2011). Effects of roasting degree on radical scavenging activity, phenolics and volatile compounds of Arabica coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(11), 2287-2296. doi: 10.1111/j.1365-2621.2011.02748.x.
- Süfer, Ö., Pandiselvam, R., & Kaya, Y. Y. (2024). Drying kinetics, powder properties, and bioactive components of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) dried by microwave-assisted foam-mat approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 1275-1287. doi: 10.1007/s13399-023-04477-2.
- Tsou, S.-F., Hsu, H.-Y., & Chen, S.-D. (2024). Effects of different pretreatments on the GABA content of germinated brown rice. *Applied Sciences*, 14(13), 5771. doi: 10.3390/app14135771.
- Vanlalsanga, Singh, S. P., & Singh, Y. T. (2019). Rice of Northeast India harbor rich genetic diversity as measured by SSR markers and Zn/Fe content. *BMC Genetics*, 20(79), 1-8. doi: 10.1186/s12863-019-0780-6.
- Vichit, W., & Saewan, N. (2015). Antioxidant activities and cytotoxicity of Thai pigmented rice. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 7(7), 329-334.
- Zaupa, M., Calani, L., Del Rio, D., Brighenti, F., & Pellegrini, N. (2015). Characterization of total antioxidant capacity and (poly) phenolic compounds of differently pigmented rice varieties and their changes during domestic cooking. *Food Chemistry*, 187, 338-347. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.04.055.

- Zhang, M. W., Zhang, R. F., Zhang, F. X., & Liu, R. H. (2010). Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7580-7587. doi: 10.1021/jf1007665.
- Zohora, K. F. T., & Arefin, M. R. (2022). Tea and tea product diversification: A Review. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(12), 2334-2353. doi: 10.24925/turjaf.v10i12.2334-2353.5280

Research article

Nutrient and Antioxidant Analysis of Indigenous Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties for Adding Value to Rice Products

Chanyarin Somporn*

Department of Science and Technology, Faculty of Liberty and Science, Rajabhat Roi Et University, Selaphum District, Roi Et Province, 45120, Thailand

ARTICLE INFO**Article history**

Received: 20 March 2026

Revised: 10 June 2026

Accepted: 11 June 2026

Online published: 30 June 2026

Keyword

indigenous rice varieties

antioxidants

instant germinated brown rice tea

foam-mat drying

ABSTRACT

This study investigated the diversity of indigenous rice varieties in Roi Et Province, Thailand; examined their nutritional content, antioxidant capacity, and phenolic compound content; and determined optimal methylcellulose (methocel) levels for producing instant germinated brown rice tea. Twenty-three rice varieties were analyzed for nutritional composition, antioxidant capacity, and total phenolic content. Kiaw Ngu showed the highest carbohydrate content (76.83%), while Niaw Hom Phu Phan exhibited the highest dietary fiber (4.97%). Kum Bai Khiaw had the highest total phenolic content (113.73 mg GAE/100 g), and Kum Noi displayed the highest antioxidant capacity (78.40% DPPH inhibition). For instant tea production, a 2.00% methocel concentration yielded the highest foam stability (1.95 mL/min) and rehydration capacity (92.12%). Consumer acceptance was highest for teas containing 1.50% and 2.00% methocel. This study provides quantitative evidence that selected pigmented indigenous varieties, particularly Kum Noi and Kum Bai Khiaw, are promising raw materials for functional rice-based beverages, supporting both the conservation of local rice biodiversity and the development of value-added products for the Thai functional-food market.

*Corresponding author

E-mail address: stchanyarin@gmail.com (C. Somporn)

Online print: 30 June 2026 Copyright © 2026. This is an open access article, production, and hosting by Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. <https://doi.org/10.14456/paj.2026.5>



PRAWARUN

AGRICULTURAL JOURNAL

VOL. 23 NO. 1 January - June 2026