

RMUTP

RESEARCH JOURNAL
Sciences and Technology



วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มิถุนายน 2569
Vol. 20 No. 1 January – June 2026

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

RMUTP RESEARCH JOURNAL Sciences and Technology

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อรุณกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยี่มนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา	รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ	แววศักดิ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.พินิตา	กังซุ่น	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล	กลีนบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสี
รองศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งรวริเชียร

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การศึกษาค่าสาดขีดคุณภาพแม่น้ำในแม่น้ำท่าจีน บริเวณอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง และ สุพัชชา ทัพสัพ	1
การพัฒนากลยุทธ์ Demand Side Management เพื่อลด Peak Load ในอาคาร เรียน โดยการวิเคราะห์แนวโน้มโหลดไฟฟ้าจากข้อมูลระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ สันติ การิษฐ์ และ สิทธิศักดิ์ ไรจยะยะ	14
ผลของวัสดุปลูกและกรรมวิธีสำหรับดูแลต้นพีชะระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง ของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง อรรถพล ตีลังจิตร สุดารัตน์ ปาโมกษ์ นวันธร รุ่งเรือง ไรจนกร เจริญปัญญา และ อภิรดี เสี่ยงสืบชาติ	27
The Optimization of Cassava Transportation to Reduce Carbon Emission Thitinun Pongnam Paramust Juntarakod Banlu Phaichin and Khanitta Chaibundit	42
คุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลเล็กซึ่งใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ผสมโพลีเอทิลีนไกลคอลเป็นสารช่วยจุดระเบิดขณะสตาร์ทเครื่องยนต์ กิตติ เอี่ยมเปรมจิต	54
ผลผลิตชีวมวลและสารต้านอนุมูลอิสระจากสาหร่ายทะเลขนาดเล็ก <i>Tisochrysis</i> sp. TISTR 11470 ภายใต้การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง นารินทร์ จันทรสว่าง เบญจวรรณ ประไพ และ พลช อาจสามารถ	66
การพัฒนาระบบถามตอบข้อมูลทางธุรกิจด้วยภาษาธรรมชาติ บนพื้นฐานปัญญาประดิษฐ์ เชิงกำเนิด นพคุณ นันทเสนีย์ และ สุดาสวรรค์ งามมงคลวงศ์	80

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลของการเติมผงผักเคลต่อคุณภาพด้านสี ความแข็ง และการยอมรับ ทางประสาทสัมผัสของวุ้น วีระศักดิ์ ศรีลารัตน์ พชรลักษณ์ วัฒนไชย สุชัญญา ปิ่นสวัสดิ์ รัตนาภรณ์ พุทธพรทิพย์ และ สินีนาถ สุขทนารักษ์	94
การจัดสรรภาระงานอย่างเหมาะสม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MILP ภายใต้ข้อจำกัดทางเวลาและการยศาสตร์ กิตติพงศ์ ศรีสวาท ประจวบ กล่อมจิตร และ ธนิตา หนูทวี	104
ผลของการใช้อิริทธิพลทดแทนน้ำตาลทรายต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของ มะพร้าวแก้วภายใต้สภาวะดัดแปลง เชาวลิต อุปลาก นีอร ดาวเจริญพร และ ธนภพ ไสตรโยม	118
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอาหารสดและอาหารสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโต ของปลาช่อนทะเล (<i>Rachycentron canadum</i>) ที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเล บริเวณ บ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่ ฤทธิชัย คงสบาย นัทธพงศ์ ชุมเชื้อ นพนนท์ ชะนะพาล ปิยะวัฒน์ พรหมรักษา วรวิช ป่านนาค และ ปิยะภาคย์ ภูมิภมร	130
A Robust Machine Learning Framework for Banana Damage Classification Using Image Processing Techniques for Smart Agricultural Quality Assessment Thanakrit Janchidfah and Narumol Chumuang	141
การศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านความร้อนในท่อเกลียวต่างองศา กฤตยชญ์ ชันธหัตถ์ ปรีดา จันทวงษ์ และ ชัยยศ ดำรงกิจโกศล	153

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

The Design of Visual Communication Barriers and Decoding Perceptions for Standardizing Signage for Deaf Drivers in Thailand Voraphan Vorakitphan and Nutch Pattananukit	168
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับอบแห้งอะโวคาโด ยุทธนา ศรีอุดม อนุรัตน์ เทวตา สังคม สัพโส และ ชินเนีย รัตภักดิ์	184
Effect of Al ₂ O ₃ Particle Reinforcement on Mechanical and Thermal Properties of UHMWPE Composites Prakorb Chartpuk and Jack Chumin	196

การศึกษาค่าสุดขีดคุณภาพแม่น้ำในแม่น้ำท่าจีน บริเวณอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม

พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง และ สุพัชชา ทัพพัช*
*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุพรรณบุรี
450 หมู่ 6 ตำบลย่านยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

รับบทความ 17 มิถุนายน 2568 แก้ไขบทความ 28 ตุลาคม 2568 ตอรับบทความ 20 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพในแม่น้ำท่าจีน พื้นที่อำเภอบางเลน โดยประยุกต์ใช้การแจกแจงสุดขีดแบบวางนัยทั่วไป (Generalized Extreme Value : GEV) ในการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ค่าความนำไฟฟ้า (EC) และค่าอุณหภูมิ (Temp) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความนำไฟฟ้าที่สูงบ่งชี้ถึงการมีสารละลายทางเคมีหรือธาตุอาหารในแม่น้ำท่าจีนมาก ส่วนค่าความร้อนของน้ำที่มีค่าสูงแสดงถึงแนวโน้มการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี สาเหตุสำคัญของปัญหานี้เกิดจากการระบายมลพิษจากภาคชุมชน อุตสาหกรรม และการเกษตร ตลอดจนการควบคุมการไหลของน้ำที่ไม่เหมาะสมหน่วยงานภาครัฐ เช่น กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม และกรมควบคุมมลพิษ ได้ดำเนินมาตรการควบคุมการทิ้งน้ำเสีย การยกระดับคุณภาพน้ำ และการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำของแม่น้ำท่าจีนให้มีการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสีย การจัดการเชิงบูรณาการ และการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำฝนลดลงซึ่งจะกระทบต่อทรัพยากรน้ำโดยตรง

คำสำคัญ : ความเป็นกรด-ด่าง; ปริมาณออกซิเจนละลาย; ความนำไฟฟ้า; อุณหภูมิ; การแจกแจงค่าสุดขีดแบบนัยทั่วไป

Study of the Extreme Values of River of Quality in the Tha Chin River, Bang-Len District, Nakhonpathom Province

Pimpan Amphanthong and Supatcha Tupsup*

Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi
450 Moo 6, Yan-Yao Subdistrict, Sam-Chuk District, Suphanburi Province, 72130

Received 17 June 2025; Revised 28 October 2025; Accepted 20 November 2025

Abstract

This study investigated the variables affecting water quality in the Tha Chin River, Bang-Len District, using the Generalized Extreme Value (GEV) distribution to analyze water quality parameters, including pH, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (EC), and temperature (Temp). The results indicate that higher EC values reflect increased dissolved substances such as nutrients or chemicals, while elevated water temperature suggests a continual decline in the river's water quality. The findings also show that rising temperature levels indicate a consistent and worsening trend of water quality degradation each year. The main causes of this problem are pollutant discharges from communities, industries, and agricultural activities, as well as inappropriate water flow management. Government agencies, such as the Department of Environmental Quality Promotion and the Pollution Control Department, have implemented measures to control wastewater discharge, improve water quality, and promote community participation in monitoring programs along the Tha Chin River. These initiatives include the development of wastewater treatment systems, integrated management strategies, and environmental impact assessments. Furthermore, climate change characterized by rising temperatures and decreasing rainfall poses a direct threat to regional water resources.

Keywords : Acidity-Alkalinity; Dissolved Oxygen; Conductivity; Temperature; Generalized Extreme Value Distribution

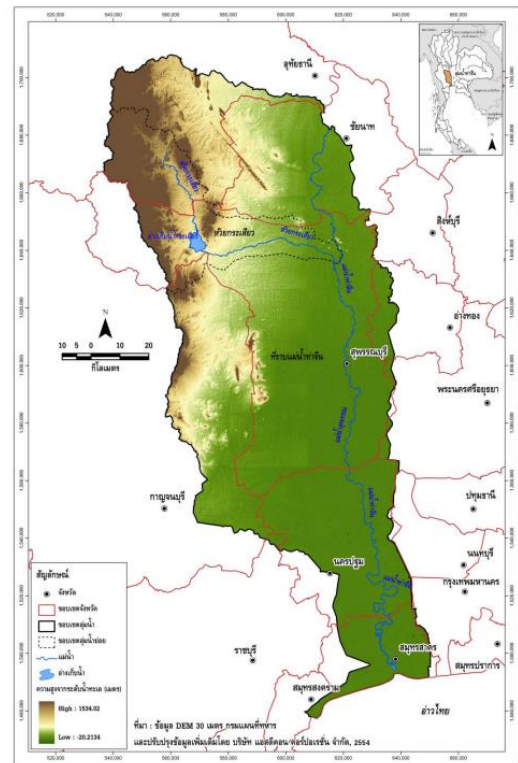
* Corresponding Author. Tel.: +666 2932 4451, E-mail Address: supatcha.t@rmutsb.ac.th

1. บทนำ

ในอดีตแม่น้ำถือว่ามีความสำคัญอย่างมากในประเทศไทยเพราะมีแม่น้ำที่สำคัญหลายสายและแม่น้ำสายต่างๆ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำรงชีวิตของประชาชนโดยตรงไม่ว่าจะเป็นด้านเศรษฐกิจ ด้านการเกษตร และด้านวัฒนธรรม แม่น้ำสายหลักของประเทศไทยส่วนใหญ่ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากภูเขาทางตอนเหนือและทางภาคตะวันตกของประเทศโดยไหลรวมกันเป็นลุ่มแม่น้ำสายหลักหล่อเลี้ยงพื้นที่ราบลุ่มภาคต่างๆ อีกทั้งเป็นแหล่งเพาะปลูกพืชข้าวที่เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญโดยเฉพาะในภาคกลาง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยาที่เป็นแม่น้ำสายหลักประกอบด้วยแม่น้ำหลายสาย เช่น แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม แม่น้ำน่าน และแม่น้ำท่าจีน ซึ่งได้ให้ความสนใจกับแม่น้ำสาขาชื่อ “แม่น้ำท่าจีน” ที่มีบางช่วงแม่น้ำไหลผ่านจังหวัดสุพรรณบุรีในบางพื้นที่ เรียกว่า “แม่น้ำสุพรรณบุรี” และพบว่าเป็นแม่น้ำที่มีโดดเด่นอย่างมากในด้านประวัติศาสตร์ ด้านการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ทางการเกษตรรวมทั้งเป็นไหลผ่านไปที่พื้นที่ในจังหวัดนครปฐมตลอดจนสิ้นสุดไหลลงสู่อ่าวไทยที่จังหวัดสมุทรสาคร จากความสำคัญของลำน้ำของแม่น้ำท่าจีนที่มีต้นกำเนิดไหลผ่านพื้นที่หลายจังหวัดในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง ตลอดจนแนวลำน้ำได้หล่อเลี้ยงพื้นที่เกษตรกรรมและชุมชนเมืองจำนวนมาก ซึ่งพื้นที่สนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจังหวัดนครปฐม ซึ่งแม่น้ำสายนี้ทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งน้ำเพื่อการเพาะปลูก แหล่งผลิตอาหาร และพื้นที่รองรับน้ำในฤดูน้ำหลาก

แม่น้ำจีนซึ่งอยู่ทางตะวันตกของที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยาและอยู่ทางตะวันออก นับจากแยกสาขาจากแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณตอนใต้จังหวัดชัยนาท (แม่น้ำมะขามเฒ่า) จนไหลผ่านจังหวัดสุพรรณบุรี (แม่น้ำสุพรรณบุรี) จังหวัดนครปฐม (แม่น้ำนครชัยศรี) และออกสู่ทะเลที่จังหวัดสมุทรสาคร (แม่น้ำท่าจีน) มีความยาวประมาณ 200 กิโลเมตร แม่น้ำท่าจีนมีลำคลอง

ต่างๆ เชื่อมต่อ ทำให้บริเวณลุ่มน้ำท่าจีนนี้อุดมสมบูรณ์เหมาะต่อการเกษตรกรรม การตั้งถิ่นฐาน การค้าภายในและภายนอกนับตั้งแต่ก่อนสมัยทวารวดีจนถึงสมัยรัตนโกสินทร์ หนึ่งในอำเภอที่แม่น้ำท่าจีนไหลผ่าน คือ อำเภอบางเลนที่มีแม่น้ำสายหลักก่อนไหลผ่านก่อนสู่อ่าวไทย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่แม่น้ำท่าจีนไหลผ่านอำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าแม่น้ำท่าจีน โดยเฉพาะพื้นที่ในอำเภอบางเลน [1] เป็นแหล่งผลิตข้าวที่มีความสำคัญต่อพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างมาก เพราะเป็นอาหารหลักมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย ลุ่มน้ำบางเลนในจังหวัดนครปฐมมีพื้นที่ทำนาจำนวน 7,537 ครัวเรือน โดยมีพื้นที่เพาะปลูก 209,580.75 ไร่ มีผลผลิตถึง 182,404.89 ตันต่อปี มีผลผลิต 870.33 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งข้อมูลนี้สะท้อนความสำคัญของพื้นที่ในการเป็นแหล่งอาหารสำคัญของภาคกลาง พื้นที่ในอำเภอบางเลนจึงมีความอุดมสมบูรณ์

ในการใช้น้ำ มีพื้นที่ในอำเภอบางเลนทั้งสิ้น 11 ตำบล ได้แก่ ตำบลดอนตูม ตำบลไทรงาม ตำบลนิลเพชร ตำบลบัวปากท่า ตำบลบางไทรป่า ตำบลผลา ตำบลบางเลน ตำบลบางหลวง ตำบลไผ่หูช้าง ตำบลลำพญา และตำบลหินมูล ในหลายปีที่ผ่านมาอำเภอบางเลนเริ่มมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและกิจกรรมเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะบริเวณตอนใต้และตะวันออกของอำเภอ เช่น ตำบลหินมูล ตำบลนราภิรมย์ และพื้นที่ใกล้แนวถนนศาลายา ซึ่งมีการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทแปรรูปสินค้าเกษตร ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ และโกดังขนาดกลางถึงขนาดใหญ่จำนวนหนึ่ง การขยายตัวดังกล่าวส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวมีศักยภาพต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ แต่ในขณะเดียวกันก็อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ดังนั้น การเลือกพื้นที่อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม เป็นพื้นที่ศึกษา จึงมีความเหมาะสมทั้งในด้านภูมิศาสตร์ และด้านลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งสะท้อนให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างการขยายตัวทางอุตสาหกรรมกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคกลางของประเทศไทย จากความสำคัญของแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลนนั้น ความสำคัญในการจ่ายน้ำเป็นคลองส่งน้ำดิบ แหล่งผลิตน้ำประปา ผังตะวันตกจ่ายน้ำไปยังผู้ใช้ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำตลอดเวลา การที่แม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลนมีคุณภาพต่ำหรือมีความเสื่อมโทรมอันเนื่องมาจากการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม แหล่งเกษตรกรรม และชุมชนลงสู่แม่น้ำ ก่อให้เกิดปัญหาการเน่าเสียของแม่น้ำที่เกิดขึ้นทำให้บางพื้นที่ไม่สามารถนำน้ำไปใช้อุปโภคบริโภคได้ ก่อให้เกิดความเดือดร้อนต่อประชาชนอย่างมาก รวมทั้งเป็นการทำลายแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำจึงส่งผลกระทบต่อประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไปด้วย ทั้งนี้การตรวจสอบวัดคุณภาพน้ำ ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญเบื้องต้นที่มีการนำทฤษฎีต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้ วิธีตรวจวัดคุณภาพด้วยวิธีต่างๆ กัน เช่น

[2], [3] ได้ศึกษาการแจกแจงแบบ GDP ทั้งกรณี 1 ตัวแปร และ 2 ตัวแปรสำหรับพยากรณ์ค่าสุดขีดของความเสียหายที่เกิดจากวาตภัย จาก [4], [5] และ [6] ได้ศึกษาสถิติของค่าสุดขีดในข้อมูลด้านน้ำ และพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ด้วยทฤษฎีสุดขีดมีความเหมาะสมและสามารถพยากรณ์ค่าได้แม่นยำในช่วง 5, 10, 20 และ 50 ปี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยเห็นว่าการศึกษาคุณภาพแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลนมีความสำคัญเนื่องจากมีประชาชนที่อาศัยบริเวณแม่น้ำท่าจีนจำนวนมากได้ใช้ประโยชน์ทั้งภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและภาคที่อยู่อาศัย จึงจำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์คุณภาพแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลนด้วยข้อมูลด้วยการแจกแจงค่าสุดขีดแบบวงนัยทั่วไปมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำของแม่น้ำท่าจีน มักพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญ [7] ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ (Temperature: Temp) แสดงความสมดุลทางนิเวศของแหล่งน้ำมีผลโดยตรงต่อกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตน้ำและการละลายของออกซิเจน โดยธรรมชาติของน้ำแสดงอุณหภูมิที่เหมาะสมมักอยู่ระหว่าง 25–30°C หากอุณหภูมิสูงเกินไปจะลดการละลายของออกซิเจนและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตน้ำ, ค่านำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) แสดงปริมาณไอออนในน้ำมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือแร่และสารละลายต่าง ๆ โดยทั่วไปควรอยู่ต่ำกว่า 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามเกณฑ์กรมควบคุมมลพิษ [8] หากค่ามีค่าสูงกว่านี้มักบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งชุมชนหรืออุตสาหกรรม, ค่าปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen: DO) เป็นตัวชี้สำคัญของคุณภาพน้ำ ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการอุปโภคบริโภค หลังการบำบัดและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ กำหนดให้มีค่า DO ไม่ต่ำกว่า 4.0 mg/L หากค่าต่ำกว่านี้อาจเกิดภาวะขาดออกซิเจน จะส่งผลต่อความหลากหลายทางชีวภาพของระบบนิเวศ และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

สะท้อนสมดุลทางเคมีของน้ำ โดยน้ำจืดที่มีคุณภาพดีมักมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5–8.5 ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินของประเทศไทย ทั้งนี้ข้อมูลของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2510 ถึง ปี พ.ศ. 2565 จำแนกข้อมูลรายวันของแต่ละสถานีบางเลน อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม โดยค่ามาตรฐานดัชนีคุณภาพน้ำที่คำนวณได้จะเปรียบเทียบกับอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 (0 เท่ากับคุณภาพต่ำที่สุด และ 100 เท่ากับคุณภาพดีที่สุด)

2. เปรียบวิธีวิจัย

การแจกแจง Generalized Extreme Value (GEV) หมายถึง การพิจารณาข้อมูลสูงสุดที่สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้แทนที่จะใช้ค่าสูงสุดในช่วงระยะที่กำหนดเท่านั้น [9], [10], [11], [12] และ [13] แสดงข้อมูลค่าสูงสุด โดยที่ส่วนมากแสดงที่ปลายหางของข้อมูล ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์เพื่อประกอบการตัดสินใจและหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น ภัยแล้ง อุทกภัย วาตภัย แผ่นดินไหว เป็นต้น มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีค่าสุดขีดอย่างแพร่หลายในข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ [14], [15] และ [16] มีฟังก์ชันความน่าจะเป็นและหาฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังสมการ (1) ดังนี้

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{(-1/\xi)-1} \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ $1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) > 0$

โดยที่

μ แทน พารามิเตอร์ตำแหน่ง (Location) ($-\infty < \mu < \infty$)

σ แทน พารามิเตอร์ขนาด (Scale) ($\sigma > 0$)

ξ แทน พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape) ($-\infty < \xi < \infty$)

ดังนั้น การแจกแจง GEV แบ่งตามพารามิเตอร์รูปร่าง ได้ 3 รูปแบบ สำหรับกรณี $\xi = 0$ เรียกว่า การแจกแจงกัมเบล (Gumbel Distribution) สำหรับกรณี $\xi > 0$ เรียกว่า การแจกแจงฟรีเชท (Fréchet Distribution) และกรณี $\xi < 0$ เรียกว่า การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด โดยจากสมการที่ (1) แสดงฟังก์ชันความน่าจะเป็นสูงสุด ดังสมการที่ (2)

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma^n} \prod_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^{-\left(\frac{1}{\xi} + 1\right)} \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right\} \quad (2)$$

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมจากข้อมูลที่รวบรวมได้จากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลน ทั้งนี้เพราะความสนใจในการตรวจค่าคุณภาพน้ำที่มีผลการบริโภคและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ด้วยค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำ โดยมีค่าที่สนใจได้แก่ 1) ค่า pH ซึ่งเป็นค่าความเป็นกลาง หรือค่าสถานะของน้ำที่มีผลเปลี่ยนไปตามค่าความเป็นพิษของน้ำที่ขึ้นลง 2) ค่า DO ซึ่งเป็นค่าปริมาณออกซิเจนของน้ำที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ 3) ค่า EC ซึ่งเป็นค่าความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยมีปัจจัยของอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบขณะทำการวัดการนำไฟฟ้า ถ้าอุณหภูมิสูงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจะสูงขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเพิ่มขึ้น 2-3% สำหรับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส เครื่องวัด EC ในปัจจุบันทำให้การอ่านค่ามาตรฐานเป็น 25°C โดยอัตโนมัติ และ 4) ค่า Temp ซึ่งเป็นค่าการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลต่อการลดปริมาณ

ของออกซิเจน โดยเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2510 ถึง ปี พ.ศ.2565 จำแนกข้อมูลรายวันของการเก็บค่าคุณภาพน้ำตามค่ามาตรฐานที่สนใจ อีกทั้งต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์การแจกแจงที่เหมาะสมด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด อีกทั้งต้องการนำค่ามาตรฐานมาแสดงระดับการเกิดซ้ำตามค่ามาตรฐานคุณภาพแม่น้ำท่าจีนในจังหวัดนครปฐมในระยะเวลา 5, 10, 20 และ 50 ปี ข้างหน้า โดยการหาแบบจำลองที่เหมาะสม มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

ขั้นที่ 1 พิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจง GEV จากสมการที่ (1)

ขั้นที่ 2 สร้างฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงสมการ (1) ด้วยสมการที่ (2)

ขั้นที่ 3 สร้างฟังก์ชันลอนของฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงสมการ (1) ที่ได้จากขั้นที่ 2

$$\ln(L(f(x))) = n \ln\left(\frac{1}{\sigma}\right) - \frac{1}{\xi} + \ln \prod_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right) \left(-\frac{1}{\xi}\right) \times \ln \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right) \right\}$$

ขั้นที่ 4 ประมาณค่าพารามิเตอร์จากฟังก์ชันที่ได้ในขั้นที่ 3 เมื่อกำหนดให้ $\hat{\mu}$ แทนตัวประมาณของ μ , $\hat{\sigma}$ แทนตัวประมาณของ σ และ $\hat{\xi}$ แทนตัวประมาณของ ξ ตามลำดับ

ขั้นที่ 5 ตรวจสอบความเหมาะสมของการแจกแจงด้วยกราฟที่แสดงค่าเบี่ยงเบนภายใต้การแจกแจงที่เหมาะสมจากประชากรที่มีการแจกแจงที่เหมาะสม

ขั้นที่ 6 การวิเคราะห์ระดับการเกิดซ้ำ (Return Level) จากขั้นที่ 5 จะได้สมการระดับการเกิดซ้ำในสมการที่ (4)

$$\hat{Z}_T = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[-\log\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right]^{-\xi} \right\} \quad (4)$$

เมื่อ T คือ รอบปีการเกิดซ้ำที่มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ โดยแทน $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ ลงในสมการ (4) จะประมาณระดับการเกิดซ้ำและหาช่วงความเชื่อมั่นได้ดังสมการที่ (5)

$$I_{\hat{Z}_T} : \hat{Z}_T \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \left(\sqrt{V(\hat{Z}_T)} \right) \quad (5)$$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลน ด้วยการแจกแจง GEV มีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้น: ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพแม่น้ำท่าจีนในจังหวัดนครปฐม ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลน มีดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้นของสถานีบางเลน

ค่า	Max	Q3	Mean	Min	SD	CV
pH	7.20	6.70	6.32	5.70	0.47	7.47%
DO	7.00	5.12	4.52	2.50	0.91	20.08%
EC	528.50	197.97	208.80	167.60	65.61	31.42%
Temp	34.70	28.42	26.70	22.80	22.66	84.88%

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าคุณภาพน้ำจากแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ แต่เมื่อค่าคุณภาพของอำเภอบางเลน ได้แก่ ค่า pH, ค่า DO และค่า Temp มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าพิจารณา ค่า EC จะมีค่าสูงกว่าค่าอื่นๆ แต่พอมาพิจารณาค่าความแปรผันของคุณภาพน้ำในแต่ละค่าพบว่าค่า Temp มีค่า 84.88% และพิจารณาข้อมูลสถานที่ตั้งของอำเภอแสดงให้เห็นว่าตลอดทางน้ำของแม่น้ำท่าจีนจะมีโรงงานที่ก่อตั้งใกล้บริเวณแม่น้ำท่าจีนอาจมีผลต่อคุณภาพของน้ำ

2. การแจกแจง GEV ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ และหารูปแบบที่เหมาะสมจากคุณภาพน้ำทั้ง 4 ค่า ได้แก่ ค่า pH , ค่า DO, ค่า EC และค่า Temp โดยแสดงผล ดังนี้

2.1 ค่าคุณภาพ pH : การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยแสดงค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้ตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าความแปรปรวนของค่า pH

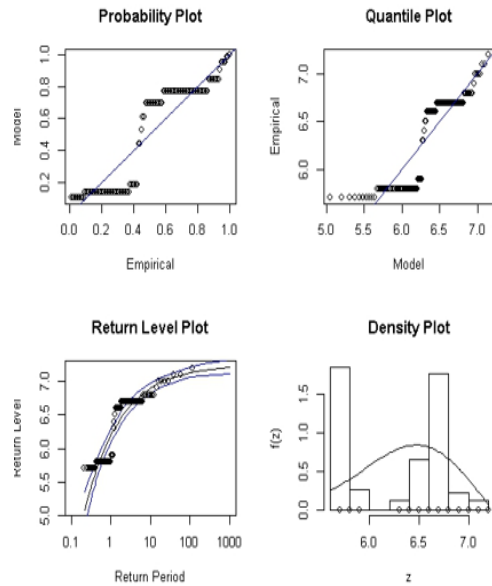
ค่าความแปรปรวน	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
$\hat{\mu}$	0.002	0.000	0.001
$\hat{\sigma}$	0.000	0.001	-0.001
$\hat{\xi}$	0.001	-0.001	0.003

จากตารางที่ 2 แสดงข้อมูลความแปรปรวนค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ ($\hat{\xi}$) ในสถานเฝ้าระวังบางเลนมีรูปร่าง 0.003 แสดงค่าเป็นบวก ($\hat{\xi} > 0$) มีข้อมูลเบ้ขวา ค่าบวก ดังนั้นพิจารณาช่วงเชื่อมั่น 95% ค่าพารามิเตอร์ ($\hat{\xi}$) จะได้ การแจกแจงไวบูลล์ เหมาะสม นอกจากนี้แสดงค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าคุณภาพ pH ได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของค่า pH

พารามิเตอร์	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์	6.19	0.49	-0.47
ค่าความคลาดเคลื่อน	0.05	0.03	0.05

จากตารางที่ 3 แสดงค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าความคลาดเคลื่อน $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด โดยมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยในทุกๆค่าพารามิเตอร์ เมื่อพิจารณากราฟของการแจกแจงข้อมูล pH พบว่า P-P plot และ Q-Q plot จะอยู่ใกล้เส้นทแยงมุม แสดงการแจกแจงที่เหมาะสมดังรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 การแจกแจงไวบูลล์แสดงค่า pH

2.2 ค่าคุณภาพ DO : การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยแสดงค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้ตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าความแปรปรวนของค่า DO

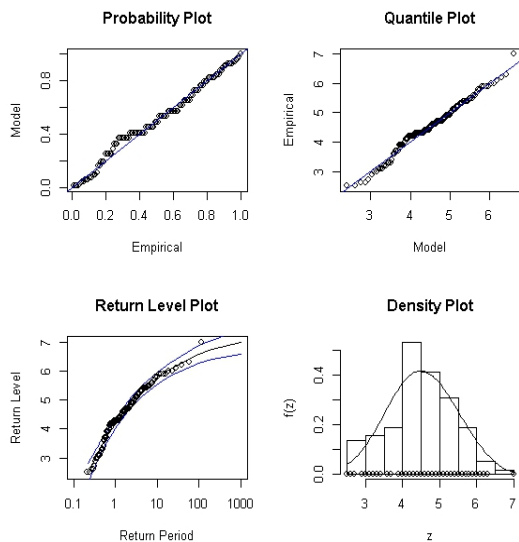
ค่าความแปรปรวน	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
$\hat{\mu}$	0.008	0.000	0.001
$\hat{\sigma}$	0.000	0.004	-0.001
$\hat{\xi}$	0.001	-0.001	0.001

จากตารางที่ 4 แสดงข้อมูลความแปรปรวนพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ ($\hat{\xi}$) ในอำเภอบางเลนมีรูปร่าง 0.001 แสดงค่าเป็นบวก ($\hat{\xi} > 0$) มีข้อมูลเบ้ขวา ค่าบวก ดังนั้นพิจารณาช่วงเชื่อมั่น 95% ค่าพารามิเตอร์ ($\hat{\xi}$) จะได้ การแจกแจงไวบูลล์ นอกจากนี้แสดงค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าคุณภาพ DO ได้ดังนี้

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ของค่า DO

พารามิเตอร์	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์	4.20	0.92	-0.28
ค่าความคลาดเคลื่อน	0.09	0.06	0.04

จากตารางที่ 5 จะได้ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ ค่าความคลาดเคลื่อน $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดพบว่าสถานะเดิมบางเลนมีค่าคลาดเคลื่อนน้อย มีพารามิเตอร์รูปร่างค่าบวก เมื่อพิจารณารูปของการแจกแจงข้อมูล pH พบว่า P-P plot และ Q-Q plot จะอยู่ใกล้เส้นทแยงมุม แสดงการแจกแจงที่เหมาะสมดังรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 การแจกแจงไวบูลล์แสดงค่า DO

2.3 ค่าคุณภาพ EC : การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยแสดงค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้ตารางที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 6 ค่าความแปรปรวนของค่า EC

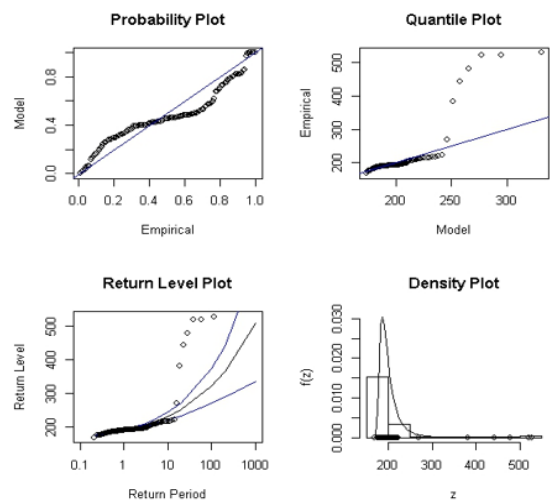
ค่าความแปรปรวน	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
$\hat{\mu}$	1.565	0.763	0.003
$\hat{\sigma}$	0.763	1.092	0.024
$\hat{\xi}$	0.003	0.024	0.002

จากตารางที่ 6 แสดงข้อมูลความแปรปรวนพารามิเตอร์ $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ (ξ) ในอำเภอบางเลนมีรูปร่าง 0.002 และมีค่าเป็นบวก ($\xi > 0$) มีข้อมูลเบ้ขวาในค่าบวก ดังนั้นพิจารณา ช่วงเชื่อมั่น 95% ค่าพารามิเตอร์ (ξ) จะได้รับการแจกแจงไวบูลล์เหมาะสม นอกจากนี้แสดงค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าคุณภาพ EC ดังนี้

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของค่า EC

พารามิเตอร์	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์	189.146	12.63	0.32
ค่าความคลาดเคลื่อน	1.25	1.04	0.04

จากตารางที่ 7 จะได้ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ ค่าความคลาดเคลื่อน $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดของแต่ละสถานะ โดยพบว่าอำเภอบางเลนมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยและมีข้อมูลเบ้ขวา ค่าบวก เมื่อพิจารณารูปของการแจกแจงข้อมูล EC พบว่า P-P plot และ Q-Q plot จะอยู่ใกล้เส้นทแยงมุม แสดงการแจกแจงที่เหมาะสมดังรูปที่ 4 ดังนี้



รูปที่ 4 การแจกแจงฟริเชทแสดงค่า EC

2.4 ค่าคุณภาพ Temp : การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยแสดงค่าความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมได้ตารางที่ 8 ดังนี้

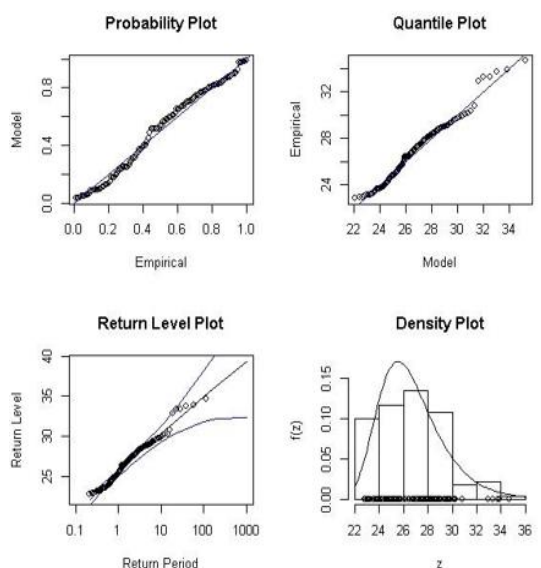
ตารางที่ 8 ค่าความแปรปรวนของค่า Temp

ค่าความแปรปรวน	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
$\hat{\mu}$	0.055	0.017	-0.008
$\hat{\sigma}$	0.017	0.030	0.006
$\hat{\xi}$	-0.008	0.006	0.007

จากตารางที่ 8 แสดงข้อมูลความแปรปรวนพารามิเตอร์ $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ (ξ) ในอำเภอบางเลนมีรูปร่าง 0.007 มีค่าพารามิเตอร์เป็นบวก ($\xi > 0$) มีข้อมูลเบ้บวก ดังนั้นพิจารณาช่วงเชื่อมั่น 95% ค่าพารามิเตอร์ (ξ) จะได้การแจกแจงไวบูลส์ นอกจากนี้แสดงค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าคุณภาพ Temp ดังนี้

ตารางที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ของค่า Temp

พารามิเตอร์	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์	25.49	2.16	-0.02
ค่าความคลาดเคลื่อน	0.23	0.17	0.08



รูปที่ 5 การแจกแจงไวบูลส์แสดงค่า Temp

จากตารางที่ 9 จะได้ค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ค่าความคลาดเคลื่อน $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ และ $\hat{\xi}$ โดยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดของแต่ละสถานี โดยพบว่าอำเภอบางเลนจะมีค่าคลาดเคลื่อนน้อย มีข้อมูลเบ้ซ้ายค่าบวกและมีพารามิเตอร์ที่มีรูปร่าง ($\xi > 0$) มีค่าเป็นบวกเมื่อพิจารณากราฟของการแจกแจงข้อมูล Temp พบว่า P-P plot และ Q-Q plot จะอยู่ใกล้เส้นทแยงมุม แสดงการแจกแจงฟริเชทที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5 ดังนี้

3. ค่าระดับการเกิดซ้ำที่เกิดเหตุการณ์โดยเฉลี่ยแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 10 ค่าระดับการเกิดซ้ำของตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพน้ำ

ตัวแปร	ระดับการเกิดซ้ำ (ปี)			
	5	10	20	50
pH	6.73 (6.65,6.81)	6.89 (6.81,6.96)	6.99 (6.92,7.08)	7.09 (7.03,7.21)
DO	5.32 (5.13, 5.53)	5.73 (5.53,5.96)	6.05 (5.84,6.33)	6.37 (6.16,6.75)
EC	213.46 (207.72,221.22)	230.79 (221.31,244.90)	251.81 (236.80,276.00)	287.30 (261.16,333.66)
Temp	28.67 (28.02,29.44)	30.23 (29.41,31.47)	31.70 (30.61,33.76)	33.57 (31.97,37.23)

จากตารางที่ 10 แสดงค่าการเกิดซ้ำของข้อมูลปริมาณน้ำรายเดือนในรอบปีการเกิดซ้ำ 5, 10, 20 และ 50 ปี ดังตาราง พบว่า สถานีเดิมบางเลนควรให้ความสำคัญกับการรักษาคุณภาพน้ำเกี่ยวกับอุณหภูมิของน้ำ นั่นคือ ค่าคุณภาพ Temp เป็นสิ่งแรก เนื่องจากมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้และมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่องตลอด

3.2 การอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับมาตรฐานคุณภาพแม่น้ำท่าจีนในอำเภอบางเลน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ค่าความนำไฟฟ้า (EC) และค่าอุณหภูมิ (Temp) ด้วยการแจกแจงสุดขีดแบบวงนัยทั่วไป (Generalized Extreme Value : GEV) ผลการศึกษาพบว่า สามารถนำ GEV มาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพแม่น้ำท่าจีนได้

อย่างเหมาะสม จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นจากสถานีบางเลนพบว่า ค่าคุณภาพน้ำโดยรวมยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่มีความแตกต่างของตัวแปรแต่ละชนิดแยกสรุปได้ 3 ประเด็นดังนี้ 1) **ด้านค่าเฉลี่ย** อยู่ในระดับใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่ ทั้งสามค่า คือ ค่า pH, ค่า DO และ ค่า Temp ส่วนค่า EC จะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าตัวแปรอื่นอย่างชัดเจน แต่ถ้าพิจารณาความผันแปรพบว่า ค่า Temp จะมีความผันแปรสูงที่สุด สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพน้ำที่ไวต่อสภาพแวดล้อม [17] ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของอำเภอบางเลนมีโรงงานอุตสาหกรรมตั้งอยู่ใกล้ลำน้ำ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น 2) **ด้านการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยการแจกแจง GEV** พบว่าทุกตัวแปรสามารถอธิบายด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ได้อย่างเหมาะสม โดยพิจารณาจากรูปแบบของพารามิเตอร์รูปร่าง สะท้อนให้เห็นข้อมูลมีลักษณะเลี้ยวแสดงให้เห็นว่า อาจมีน้ำเสียเฉียบพลัน หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและผลของ P-P plot และ Q-Q plot ที่ชี้ให้เห็นว่าการแจกแจงสอดคล้องกับข้อมูลจริง ได้แก่ ค่า pH จะแสดงข้อมูลที่มีค่าแนวโน้มสูงขึ้นแต่ไม่เกิดไม่บ่อย ค่า DO จะแสดงข้อมูลที่มีค่าความเข้มข้นสูงบางช่วงเวลา ค่า EC จะแสดงค่าความนำไฟฟ้าสูงในบางช่วง ซึ่งสัมพันธ์กับการปนเปื้อนสารละลาย และ ค่า Temp จะแสดงข้อมูลสอดคล้องกับสภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและสภาวะแวดล้อม และ 3) **ด้านการวิเคราะห์ระดับการเกิดซ้ำ** จากการคำนวณค่าการเกิดซ้ำในรอบ 5, 10, 20 และ 50 ปี พบแนวโน้มของค่า pH และ ค่า DO มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในแต่ละช่วงปี แสดงถึงความเสถียรของคุณภาพน้ำในมิติความเป็นกรด-ด่างและออกซิเจนละลาย ส่วน ค่า EC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสะท้อนถึงการสะสมของสารละลายในน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับกิจกรรมอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมและค่า Temp มีแนวโน้มสูงขึ้นชัดเจนบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของ

สภาพภูมิอากาศและผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ในพื้นที่ จากผลดังกล่าว ตัวแปรอุณหภูมิ (Temp) เป็นปัจจัยที่ควรเฝ้าระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง และเกินค่ามาตรฐานในบางช่วง ซึ่งอาจส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบนิเวศในแม่น้ำ เช่น การลดลงของออกซิเจนละลาย และการเพิ่มขึ้นของการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำ

4. สรุป

จากการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีน อำเภอบางเลน โดยการใช้การแจกแจงค่าสุดขีดแบบวางนัยทั่วไป (GEV) พบว่าตัวแปรด้านคุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ค่าความนำไฟฟ้า (EC) และค่าอุณหภูมิ (Temp) มีลักษณะการกระจายที่แตกต่างกันตามฤดูกาลและปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยมีแนวโน้มการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะค่าความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่ชี้ว่าคุณภาพน้ำผิวดินในประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบลำน้ำ โดยพบได้จากค่าน้ำในฤดูฝน จะมีค่าน้ำบางตัวลดลง ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง แต่ค่าความขุ่น สี และสารอินทรีย์รวมถึงปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ [18] และ [19] ที่รายงานว่า น้ำฝนมีผลต่อการเจือจางและการชะล้างสารมลพิษจากผิวดินลงสู่แม่น้ำ ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล นอกจากนี้ ค่าความนำไฟฟ้า (EC) ที่พบว่าสูงในพื้นที่บางเลน สะท้อนถึงการมีสารละลายทางเคมีหรือแร่ธาตุในน้ำสูง ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมและกิจกรรมเกษตรกรรมใกล้ลำน้ำ การเพิ่มขึ้นของค่า EC แสดงถึงการสะสมของสารมลพิษละลายน้ำ เช่น สารเคมีเกษตรหรือของเสียจากการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับ [20] รายงานว่าปากแม่น้ำท่าจีนมีคุณภาพน้ำแย่ที่สุด และ

ชุมชนท้องถิ่นมีแนวโน้มที่จะรับรู้คุณภาพน้ำในแม่น้ำในเชิงบวกมากกว่าที่การประเมิน WQI แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพน้ำระหว่างสถานีเก็บตัวอย่างอันเป็นผลมาจากอิทธิพลของกิจกรรมการใช้ที่ดินและการปล่อยน้ำเสียจากชุมชนในแต่ละพื้นที่ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [21] ที่อธิบายว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยโลกจากภาวะโลกร้อน (สูงขึ้น 2–3 องศาเซลเซียส) ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำฝนและการระเหยที่มากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในระยะยาว นอกจากนี้ถ้าทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาของ [22] ที่วิเคราะห์น้ำดิบและน้ำประปาหมู่บ้านในจังหวัดนครราชสีมา พบว่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น อุณหภูมิ ความขุ่น สี และ ค่า pH ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ค่าคลอรีนคงเหลือต่ำแสดงให้เห็นว่าคุณภาพน้ำผิวดินแม้อยู่ในเกณฑ์ดี แต่ยังคงต้องการปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการบริโภค เช่นเดียวกับในพื้นที่แม่น้ำท่าจีนที่ยังจำเป็นต้องมีการบำบัดและควบคุมคุณภาพก่อนการใช้งาน ประเด็นความสำคัญของการจัดการน้ำโดยชุมชนและหน่วยงานท้องถิ่นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [23] ซึ่งชี้ให้เห็นถึงบทบาทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการเฝ้าระวังและจัดการคุณภาพน้ำ ขณะที่ [24] แสดงให้เห็นว่าการมีส่วนร่วมของประชาชนเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการอนุรักษ์และฟื้นฟูแหล่งน้ำในระดับชุมชน ข้อมูลนี้สอดคล้องกับการดำเนินงานของกรมควบคุมมลพิษและกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม ที่มุ่งกำหนดมาตรการควบคุมการทิ้งน้ำเสียและติดตามคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics, *Agricultural Statistics of Thailand 2024*. Bangkok, Thailand: Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2025. [Online]. Available: <https://catalog.oae.go.th/th/dataset/dataoae3101>. [Accessed: Oct. 25, 2025].
- [2] A. M. Meyer, C. Klein, E. Fünfroeken, R. Kautenburger, and H. P. Beck, “Real-time monitoring of water quality to identify pollution pathways in small and middle scale rivers,” *Science of the Total Environment*, vol. 651, pp. 2323–2333, 2019.
- [3] B. Brabson and J. Palutikof, “Tests of the generalized Pareto distribution for predicting extreme wind speeds,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 39, pp. 1627–1640, 1999.
- [4] K. Puczko and E. J. Rudczyk, “Analysis of urban land cover influence on organic carbon and nutrients in surface water via impacted groundwater,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, pp. 145, 2020.
- [5] K. Puczko and E. J. Rudczyk, “Extreme-value analysis for the characterization of extremes in water resources: A generalized workflow and case study on New Mexico monsoon precipitation,” *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, 2020.
- [6] K. S. Nemani, S. Peldszus, and P. M. Huck, “Practical framework for evaluation and improvement of drinking water treatment robustness in preparation for extreme-weather-related adverse water quality events,” *ACS ES&T Water*, vol. 3, no. 5, pp. 1305–1313, 2023.

- [7] Pollution Control Department, "Notification of the National Environment Board No. 8 (B.E. 2537): Surface Water Quality Standards for Inland Water Bodies," Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok, Thailand, 1994.
- [8] W. Simachaya, "Water quality management in Thailand," presented at the Workshop on Environmentally Sound Technology on Water Quality Management, United Nations Environment Programme and Mekong River Commission, Nov. 2000. [Online]. Available: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/04/pcdnew-2020-04-22_08-59-15_424617.pdf. [Accessed: Oct. 26, 2025].
- [9] E. Brodin and H. Rootzen, "Univariate and bivariate GPD methods for predicting extreme wind storm losses," *Insurance: Mathematics and Economics*, vol. 44, no.3, pp. 345–356, 2009.
- [10] J. Beirlant, Y. Goegebeur, J. Teugels, and J. Segers, *Statistics of Extremes: Theory and Applications*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [11] L. E. McPhillips, H. Chang, M. V. Chester, Y. Depietri, E. Friedman, N. B. Grimm, J. S. Kominoski, T. McPherson, P. M. Lazaro, E. J. Rosi, and J. S. Shiva, "Defining extreme events: A cross-disciplinary review," *Earth's Future*, vol. 6, pp. 441–455, 2018.
- [12] L. Rajaram, "Statistical models in environmental and life sciences," Ph.D. dissertation, Dept. Math. Stat., Univ. South Florida, Tampa, FL, 2006.
- [13] P. Embrecht, C. Klüppelberg, and T. Mikosch, *Modeling Extremal Events for Insurance and Finance*. Berlin, Germany: Springer, 1997.
- [14] R. B. Nelson, *An Introduction to Copulas*. New York: Springer, 2006.
- [15] R. W. Katz, M. B. Parlange, and P. Naveau, "Statistics of extremes in hydrology," *Advance in Water Resource*, vol. 25, no.8-12, pp. 1287–1304, 2002.
- [16] S. Kotz and S. Nadaraja, *Extreme Value Distributions: Theory and Applications*. London: Imperial College Press, 2000.
- [17] *Research report*, Study of physical, chemical, and biological water quality in the resource protection area at the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) Sirindhorn Dam, Ubon Ratchathani Province, Institute of Public Health, Suranaree University of Technology, 2019.
- [18] *Research report*, "Water quality assessment of Bang Khen Mai Canal using variance analysis, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, 2021.
- [19] C. Tasantea, "Study on the production process and quality of tap water in Tharaprasat Sub-district, Non Sung District,

- Nakhon Ratchasima Province,” M.S. thesis, Dept. Technol. Rural Develop., Fac. Sci. Technol., Thammasat Univ., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2018.
- [20] C. Pratum, N. Arunrat, S. Sereenonchai, J.-C. Huang, and T. Xu, “Water quality situation of the Tha Chin River and the riverbank community’s understanding,” *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 1045–1051, 2019.
- [21] S. Javadinejad, R. Dara, and F. Jafary, “Impacts of extreme events on water availability,” *Annals of Geographical Studies*, vol. 2, no. 3, pp. 16–24, 2019.
- [22] S. J. Tea and P. Boonyaprapa, “Environmental impact from water quality problems and recommendations for monitoring activities: A case study of Li River Basin, Lamphun Province,” *HCU Journal of Health Science*, vol. 32, no. 1, pp. 1–10, 2019.
- [23] S. Nawagawong, C. Chitmanat, P. Chaibu, and S. Aroonsrimorakot, “The guidelines for water quality management on the middle of Tha Chin River,” *Health Science Journal of Thailand*, vol. 6, no. 4, pp. 26–33, 2024.
- [24] S. Choo-In, S. Kasemsawat, J. Sriwilai, and N. Kuanprasert, “The participation of surface water quality management, Amphawa District, Samut Songkhram, Thailand,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 197, pp. 1551–1557, 2015.

การพัฒนากลยุทธ์ Demand Side Management เพื่อลด Peak Load ในอาคารเรียน โดยการวิเคราะห์แนวโน้มโหลดไฟฟ้าจากข้อมูลระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์

สันติ การิสันต์^{1*} และ สิทธิศักดิ์ ไรจขะยะ²

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹99 หมู่ที่ 4 ตำบลทองเนียน อำเภอนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

²179 หมู่ที่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสีกา จังหวัดตรัง 92150

รับบทความ 31 มีนาคม 2568 แก้ไขบทความ 27 มกราคม 2569 ตอรับบทความ 2 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์แนวโน้มโหลดพลังงานสูงสุด (Peak Load) และการพัฒนากลยุทธ์การบริหารจัดการพลังงาน (DSM) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารเรียนรวมช่วงอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ ในช่วงเดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 ผลการศึกษาพบว่า ค่า Peak Load เฉลี่ยรายวันในช่วง 1 - 10 ธันวาคม 2567 อยู่ที่ 151.3kW และ Load Factor เท่ากับ 0.59 ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่วง 1 - 10 มกราคม 2568 ที่ค่า Peak Load เพิ่มขึ้นเป็น 162.4kW และ Load Factor เพิ่มขึ้นเป็น 0.63 แสดงถึงการใช้พลังงานที่มีความสมดุลดีขึ้นในช่วงต้นปี โดยในช่วง 21 - 31 มกราคม 2568 Peak Load สูงสุดที่ 165.4kW และ Load Factor เท่ากับ 0.63 ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานในช่วงฤดูร้อน ส่วนในเดือนกุมภาพันธ์ Peak Load ลดลงเป็น 154.1kW ซึ่งอาจเกิดจากการปรับพฤติกรรมการใช้พลังงานภายในอาคาร จากการศึกษาพบว่าการกระจายภาระโหลดไฟฟ้าและการใช้ระบบควบคุมโหลดอัตโนมัติสามารถลด Peak Load และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ นอกจากนี้การพัฒนาระบบพลังงานอัจฉริยะและการนำระบบ Demand Response มาใช้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการพลังงานในระยะยาว ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการ DSM นี้สามารถคืนทุนภายใน 3.42 ปี และสร้างกำไรสุทธิประมาณ 200,000 บาท ภายใน 5 ปี โดยใช้เทคนิค DSM ที่เหมาะสม เช่น การปรับพฤติกรรมการใช้พลังงาน, การใช้พลังงานทดแทน, การควบคุมโหลด และเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน ช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารเรียน

คำสำคัญ : การจัดการด้านความต้องการพลังงาน; โหลดสูงสุด; ปล่อยโหลด; การจัดการพลังงานในอาคาร

Development of Demand Side Management Strategies to Reduce Peak Load in Educational Buildings through Electrical Load Trend Analysis from Real-Time Monitoring Data

Santi Karisan^{1*} and Sittisak Rojchaya²

¹College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

²Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

¹99 Moo 4, Thong Nian Subdistrict, Khanom District, Nakhon Si Thammarat Province, 80210

²179 Moo 3, Mai Fat Subdistrict, Sikao District, Trang Province, 92150

Received 31 March 2025; Revised 27 January 2026; Accepted 2 March 2026

Abstract

This study focuses on analyzing the peak load trends and developing Demand Side Management (DSM) strategies to enhance energy efficiency in the Industrial Technician Building at the College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, using real-time monitoring data from December 2024 to February 2025. The results show that the average daily peak load from December 1–10, 2024, was 151.3 kW with a Load Factor of 0.59, the lowest compared to the period from January 1–10, 2025, where the peak load increased to 162.4 kW and the Load Factor rose to 0.63, indicating a better energy balance early in the year. The highest peak load of 165.4 kW with a Load Factor of 0.63 occurred from January 21–31, 2025, showing increased energy use during the summer season. In February, the peak load decreased to 154.1 kW, possibly due to changes in energy usage behavior. The study suggests that redistributing the electrical load and using an automatic load control system can reduce peak load and improve energy efficiency. Furthermore, developing an intelligent energy system and implementing Demand Response can enhance long-term energy management. Economic analysis indicates that the DSM project can break even in 3.42 years and generate a net profit of approximately 200,000 baht within 5 years by utilizing appropriate DSM techniques, such as changing energy usage behavior, using renewable energy, load control, and energy-saving technologies, all of which will help reduce the load on the electrical system and improve energy efficiency in the building.

Keywords: Demand Side Management; Peak Load; Load Factor; Energy Management in Buildings

* Corresponding Author. Tel.: +668 9924 1322, E-mail Address: santi.k@rmutsv.ac.th

1. บทนำ

การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารเรียนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดต้นทุนการดำเนินงานและการรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี การจัดการด้านอุปสงค์พลังงาน (Demand Side Management: DSM) จึงเป็นแนวทางสำคัญที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดภาระค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น อาคารเรียนเป็นสถานที่ที่มีรูปแบบการใช้พลังงานที่มีลักษณะเฉพาะ โดยมักมีการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลาการเรียนการสอนและกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยโหลดหลากหลายประเภท เช่น ระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์สำนักงาน และอุปกรณ์การเรียนการสอน ส่งผลให้เกิดโหลดไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) ในบางช่วงเวลาของวัน ปัญหาดังกล่าวนำไปสู่ความท้าทายในการบริหารจัดการพลังงาน เนื่องจากค่า Peak Load มีผลโดยตรงต่อการคิดค่าไฟฟ้า โดยเฉพาะในกรณีที่มีการคิดค่าไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of Use: TOU) หรือการคิดค่าไฟฟ้าตามความต้องการพลังงานสูงสุด (Demand Charge) [1]- [3]

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ข้อมูลโหลดไฟฟ้าจากระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ในอาคารเรียน เพื่อนำมาพัฒนากลยุทธ์ DSM ที่มีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ข้อมูลครอบคลุมระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2567 ถึงกุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้งานอาคารเรียนอย่างเต็มที่ การวิเคราะห์ดำเนินการในหลายระดับ ได้แก่ การวิเคราะห์แนวโน้มรายวัน (Daily Trends) การวิเคราะห์แนวโน้มรายสัปดาห์ (Weekly Trends) และการวิเคราะห์แนวโน้มรายฤดูกาล (Seasonal Trends) โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ Peak Load, Off-Peak Load, การใช้พลังงานรวม (Total Energy Consumption) และค่า Load Factor [4]- [6] ความสำคัญของการลด Peak Load ในอาคารเรียน

ไม่เพียงแต่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังมีส่วนสำคัญในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ลดการลงทุนในการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้า และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย การพัฒนากลยุทธ์ DSM ที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางสำคัญในการบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน [7]- [8]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) วิเคราะห์แนวโน้มและพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารเรียน 2) พัฒนากลยุทธ์ DSM ที่เหมาะสมสำหรับการลด Peak Load และ 3) ประเมินประสิทธิภาพของกลยุทธ์ DSM ที่นำเสนอ ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนและบริหารจัดการพลังงานในอาคารเรียนและอาคารประเภทอื่น ๆ ที่มีลักษณะการใช้พลังงานที่คล้ายคลึงกัน [9]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ โดยมีขั้นตอนและกระบวนการดำเนินการวิจัยดังนี้

2.1 การเตรียมข้อมูล

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลโหลดไฟฟ้าจากระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ของอาคารเรียน โดยมีรายละเอียดดังนี้ แหล่งข้อมูล ข้อมูลจากไฟล์บันทึกค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าจากระบบตรวจวัดพลังงานที่บันทึกเป็น Time Series (รายวัน, รายชั่วโมง) ระยะเวลาเก็บข้อมูล เดือนธันวาคม 2567 ถึง กุมภาพันธ์ 2568 (ระยะเวลา 3 เดือน) ตัวแปรที่เก็บรวบรวม วันที่ (Date) กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา (Current) กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kW) พลังงานรวม (kWh) ข้อมูลที่รวบรวมได้ถูกแปลงให้เป็นรูปแบบ Time Series ที่มีการกำหนดคอลัมน์เวลาที่ต้องการ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ [1]- [4]

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

2.2.1 การวิเคราะห์แนวโน้มรายวัน (Daily Trends) วิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูงสุด (Peak) และต่ำสุด (Off-Peak) ในแต่ละวัน แบ่งข้อมูลตามวัน (Date) โดยใช้ข้อมูล Time Series คำนวณค่า Peak Load และ Average Load ในแต่ละวัน ตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานและระบุช่วงเวลาที่เกิด Peak Load [5]- [6]

2.2.2 การวิเคราะห์แนวโน้มรายสัปดาห์ (Weekly Trends) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานในแต่ละสัปดาห์ แบ่งข้อมูลตามสัปดาห์โดยการรวมข้อมูลจากวันในแต่ละสัปดาห์ คำนวณ Peak Load และ Average Load ในแต่ละสัปดาห์ วิเคราะห์ความแตกต่างของการใช้พลังงานระหว่างวันทำงานและวันหยุด [5]- [6]

2.2.3 การวิเคราะห์แนวโน้มรายฤดูกาล (Seasonal Trends) วิเคราะห์ผลกระทบของช่วงเวลาในรอบปีต่อการใช้พลังงาน แบ่งข้อมูลตามเดือน (ธันวาคม 2567, มกราคม 2568, กุมภาพันธ์ 2568) คำนวณ Peak Load, Off-Peak Load, Total Energy Consumption และ Load Factor ในแต่ละเดือน วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลาการศึกษา [6]- [7]

2.3 การคำนวณตัวชี้วัดสำคัญ

การศึกษานี้ใช้ตัวชี้วัดสำคัญดังนี้

2.3.1 Peak Load (kW) คำนวณค่าพลังงานสูงสุดสำหรับแต่ละช่วงเวลาที่น่าสนใจ (วัน, สัปดาห์, เดือน) ระบุช่วงเวลาที่เกิด Peak Load เพื่อใช้ในการวางแผนมาตรการลดการใช้พลังงาน

2.3.2 Off-Peak Load (kW) คำนวณค่าพลังงานต่ำสุดในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานน้อย วิเคราะห์ความต่างระหว่าง Peak Load และ Off-Peak Load

2.3.3 Load Factor คำนวณด้วยสูตร

$$\text{Load Factor} = \frac{\text{Total Energy Consumption}}{\text{Peak Load} \times \text{Time Period}} \quad (1)$$

วิเคราะห์ความสม่ำเสมอของการใช้พลังงาน (ค่ายิ่งสูงแสดงว่าโหลดมีความสม่ำเสมอและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ) [6]- [7]

2.3.4 Total Energy Consumption (kWh) คำนวณปริมาณพลังงานรวมที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลา ติดตามแนวโน้มการใช้พลังงานโดยรวม

2.4 การพัฒนากลยุทธ์ Demand Side Management (DSM)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล มีการพัฒนากลยุทธ์ DSM เพื่อลด Peak Load ดังนี้

2.4.1 การกระจายโหลดไปยังช่วง Off-Peak

2.4.2 การนำระบบ Demand Response มาใช้เพื่อลดความต่างระหว่าง Peak และ Off-Peak

2.4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ

2.4.4 การใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากระบบไฟฟ้าหลัก [5], [9]

2.5 การประเมินประสิทธิภาพของกลยุทธ์ DSM

การประเมินประสิทธิภาพดำเนินการโดยการจำลอง (Simulation) ของระบบ ใช้ข้อมูลโหลดจริงจากระบบตรวจวัดพลังงานที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สำคัญก่อนและหลังนำกลยุทธ์ DSM มาใช้ ดังนี้

2.5.1 การเปลี่ยนแปลงของ Peak Load (kW)

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงของ Load Factor

2.5.3 การลดลงของต้นทุนพลังงาน (USD/Day)

2.5.4 การเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพระบบ (System Stability Score)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การเก็บข้อมูล

ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้ากำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิสายเมนหลัก ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการใช้พลังงานของอาคารในแต่ละวัน ข้อมูลเหล่านี้ถูกรวบรวมจากระบบตรวจวัดพลังงานที่ใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าและเชื่อมต่อกับระบบ IoT เป็นระยะเวลา 3 เดือน (ธันวาคม 2567 ถึง กุมภาพันธ์ 2568) โดยระบบสามารถเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ที่มีความละเอียดสูง sampling rate 1 นาที เพื่อแสดงความแม่นยำและรายละเอียดของการใช้งาน นอกจากนี้ระบบยังสามารถส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน กรณีเกิดความผิดปกติ และผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อการตรวจสอบสถานะของระบบได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 1 การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT

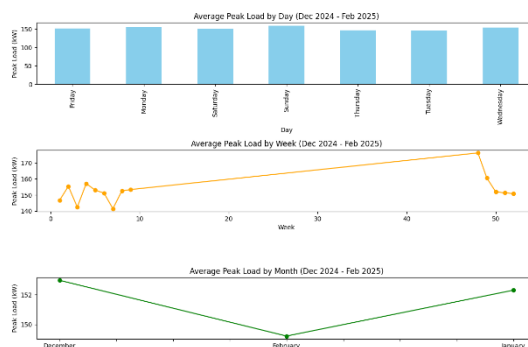
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างระบบกับเครื่องมือวัด (เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน)

Phase	Reference Value (A)	Measured Value (A)	Error Percentage %
Phase A	7.66	7.6	0.78
Phase B	14.31	14.3	0.07
Phase C	13.43	13.4	0.22

3.2 การคำนวณ Peak Load และ Load Factor

คำนวณ ค่า Peak Load สำหรับแต่ละช่วงเวลาที่น่าสนใจ (วัน, สัปดาห์, เดือน) โดยพิจารณาค่าพลังงานสูงสุดในช่วงเวลานั้น

3.2.1 การวิเคราะห์แนวโน้มโหลดพลังงานสูงสุดเฉลี่ย (Average Peak Load) ในอาคารเรียนดำเนินการโดยใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดพลังงานเป็นระยะเวลา 3 เดือน (ธันวาคม 2567 - กุมภาพันธ์ 2568) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสูงสุดที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลา



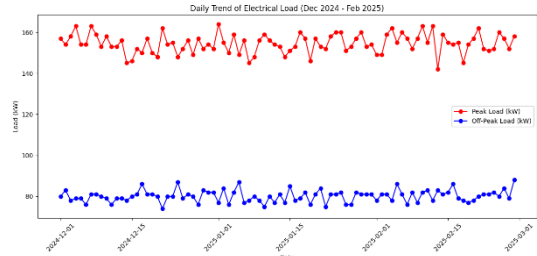
รูปที่ 2 แนวโน้มโหลดพลังงานสูงสุดเฉลี่ยในอาคารเรียน (ธันวาคม 2567 - กุมภาพันธ์ 2568)

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่า Average Peak Load by Day (ค่าเฉลี่ยโหลดสูงสุดรายวัน) ค่า Peak Load ในแต่ละวันของสัปดาห์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน หมายความว่าพฤติกรรมการใช้พลังงานรายวันไม่มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งอาจสะท้อนว่าโหลดไฟฟ้าในอาคารมีรูปแบบการทำงานที่สม่ำเสมอ กรณีศึกษาเพิ่มเติม ถ้าเป็นอาคารเรียนค่านี้อาจสะท้อนว่ามีการใช้พลังงานทั้งวันทำการและวันหยุดในระดับใกล้เคียงกัน หากต้องการหาความแตกต่างเพิ่มเติม อาจต้องพิจารณาช่วงเวลาในแต่ละวัน (Hourly Load Profile) ค่า Average Peak Load by Week (ค่าเฉลี่ยโหลดสูงสุดรายสัปดาห์) พบว่า ค่า Peak Load มีความผันผวนในช่วงแรก

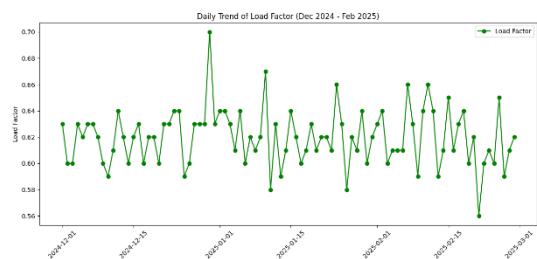
แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงท้าย แนวโน้มนี้อาจบ่งบอกว่า มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้าในบางช่วงสัปดาห์ เช่น ช่วงที่โหลดเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการเปิดใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือมีการะโหลดจากกิจกรรมพิเศษ ช่วงที่โหลดลดลง อาจเกิดจากช่วงวันหยุดหรือการลดภาระโหลดของอาคาร ส่วนค่า Average Peak Load by Month (ค่าเฉลี่ยโหลดสูงสุดรายเดือน) พบว่า ค่า Peak Load สูงในเดือนธันวาคมและมกราคม แต่ลดลงในเดือนกุมภาพันธ์ การตีความเชิงลึกได้ว่าค่าที่ลดลงในเดือนกุมภาพันธ์อาจเกิดจาก การลดการใช้พลังงานหลังจากช่วงเดือนธันวาคม 2567 – มกราคม 2568 ซึ่งอาจเป็นช่วงที่มีการะโหลดสูงกว่าปกติ หากเป็นอาคารเรียนอาจเกี่ยวข้องกับลักษณะการเรียนการสอนที่ลดลง ถ้าพิจารณาปัจจัยด้านสภาพอากาศ ช่วงธันวาคม 2567 – มกราคม 2568 อาจมีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้การใช้ระบบทำความร้อนหรืออุปกรณ์บางชนิดเพิ่มขึ้น ข้อเสนอแนะควรตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานของอาคารว่าเกิดจากความต้องการของผู้ใช้ หรือปัจจัยภายนอก เช่น ฤดูกาล เพื่อหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานให้เหมาะสม สรุปได้ว่าโหลดรายวันค่อนข้างคงที่ บ่งบอกถึงรูปแบบการใช้งานที่มีเสถียรภาพ โหลดรายสัปดาห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นก่อนลดลง อาจมีการเปลี่ยนแปลงด้านกิจกรรมหรือโหลดในบางช่วง โหลดรายเดือนลดลงในเดือนกุมภาพันธ์ อาจเกิดจากฤดูกาลหรือพฤติกรรมการใช้พลังงานที่เปลี่ยนแปลง

3.2.2 การวิเคราะห์แนวโน้มรายวัน (Daily Trends) เป้าหมายคือการวิเคราะห์ว่าในแต่ละวันมีช่วงเวลาที่ใช้พลังงานสูงสุดหรือไม่ เช่น ช่วงเช้า (เวลาทำงาน) และช่วงเย็น (เวลาพัก) หรือช่วงกลางคืนที่โหลดไฟฟ้าลดลง กระบวนการวิเคราะห์จะทำการแบ่งข้อมูลตามวัน (Date) โดยใช้ข้อมูล Time Series ที่มีอยู่ คำนวณ Peak Load และ Average Load ในแต่ละวัน ตรวจสอบพฤติกรรมการใช้พลังงานว่า Peak Load

เกิดขึ้นในช่วงไหนของวัน ประโยชน์ช่วยในการวางแผนการใช้พลังงานในช่วงเวลา Peak และ Off-Peak ได้ดีขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การวิเคราะห์เชิงลึกของการใช้พลังงานไฟฟ้า และค่าตัวประกอบโหลด (ธันวาคม 2567 - กุมภาพันธ์ 2568)

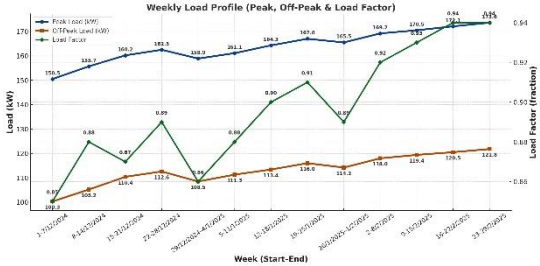
จากกราฟรูปที่ 3 (ก) พบว่า ค่าโหลดสูงสุดรายวันเคลื่อนไหวในช่วง 155–195kW (ค่าเฉลี่ย 175kW) และมักเกิดสูงสุดกลางสัปดาห์ ขณะที่ค่าโหลดต่ำสุดอยู่ในช่วง 50–70kW (ค่าเฉลี่ย 60kW) ช่วง peak-to-valley ประมาณ 115kW สะท้อนรูปแบบการใช้ไฟฟ้าที่คงที่ สำหรับ รูปที่ 3 (ข) ค่าตัวประกอบโหลดรายวันอยู่ในช่วง 0.35–0.70 (ค่าเฉลี่ย 0.42) โดยมีค่าสูงสุดผิดปกติช่วงกลางเดือนธันวาคมถึง 0.70 ซึ่งบ่งชี้ถึงการใช้ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงหรือรูปแบบการใช้งานเปลี่ยนแปลง ทั้งสองกราฟร่วมกันแสดงความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างโหลดสูงสุดและตัวประกอบโหลด คือ ช่วงโหลดสูงสุดมากมักมีตัวประกอบโหลดต่ำ และตัวประกอบโหลดสูงเกิดเมื่อโหลดสูงสุดต่ำลง สรุปได้ว่า

ระบบไฟฟ้ามีความผันผวนเฉพาะตัวและค่าตัวประกอบโหลดเฉลี่ยต่ำ แสดงโอกาสในการปรับปรุงผ่าน DSM เพื่อกระจายการใช้ไฟฟ้า ลดต้นทุน และเพิ่มความมั่นคงของระบบระยะยาว

3.2.3 การวิเคราะห์แนวโน้มรายสัปดาห์ (Weekly Trends) เป้าหมายคือการวิเคราะห์ว่าในแต่ละสัปดาห์มีการเปลี่ยนแปลงของการใช้พลังงานหรือไม่ เช่น วันจันทร์ที่ใช้พลังงานมากกว่าในช่วงวันหยุดสุดสัปดาห์ กระบวนการวิเคราะห์จะทำการแบ่งข้อมูลตามสัปดาห์โดยใช้การรวมข้อมูลจากวันในแต่ละสัปดาห์ คำนวณ Peak Load และ Average Load ในแต่ละสัปดาห์ วิเคราะห์แนวโน้มของ Peak Load ว่ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงในช่วงวันทำงานหรือวันหยุด ประโยชน์สามารถตรวจสอบการใช้พลังงานในช่วงวันธรรมดากับวันหยุดได้

ตารางที่ 2 ตารางแนวโน้มรายสัปดาห์ (Weekly Trend)

Week (Start-End)	Peak Load (kW)	Off-Peak Load (kW)	Load Factor
1-7/12/2024	150.5	100.3	0.85
8-14/12/2024	155.7	105.2	0.88
15-21/12/2024	160.2	110.4	0.87
22-28/12/2024	162.5	112.6	0.89
29/12/2024 – 4/1/2025	158.9	108.5	0.86
5-11/1/2025	161.1	111.3	0.88
12-18/1/2025	164.3	113.4	0.90
19-25/1/2025	167.0	116.0	0.91
26/1/2025 – 1/2/2025	165.5	114.2	0.89
2-8/2/2025	169.2	118.0	0.92
9-15/2/2025	170.5	119.4	0.93
16-22/2/2025	172.1	120.5	0.94
23-29/2/2025	173.6	121.8	0.94



รูปที่ 4 การวิเคราะห์เชิงเวลาของการใช้พลังงานไฟฟ้า และค่าตัวประกอบโหลดรายสัปดาห์ (ธันวาคม 2567 - กุมภาพันธ์ 2568)

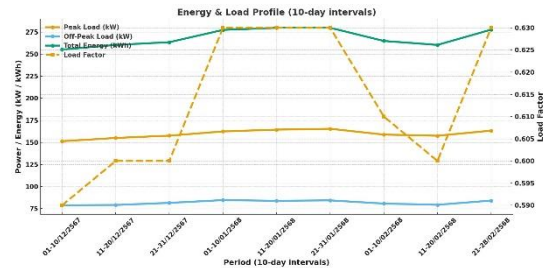
จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า Peak Load (kW) Peak Load คือการใช้พลังงานสูงสุดในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งแสดงถึงความต้องการพลังงานที่สูงสุดในช่วงเวลานั้น ๆ ค่าของ Peak Load เริ่มต้นที่ 150.5kW ในวันที่ 1 ธันวาคม 2567 และเพิ่มขึ้นจนถึง 173.6kW ในวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2568 โดยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานสูงสุดในช่วงเวลานั้น ๆ สรุปได้ว่าค่า Peak Load มีการเพิ่มขึ้นประมาณ 15.3kW ในช่วงเวลา 2 เดือน (จาก 150.5kW เป็น 173.6kW) แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานในช่วงพัก Off-Peak Load (kW) คือการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่ไม่ได้อยู่ในช่วงพัก ซึ่งแสดงถึงการใช้พลังงานในเวลาที่มีความต้องการพลังงานน้อย ค่าของ Off-Peak Load เริ่มต้นที่ 100.3kW ในวันที่ 1 ธันวาคม 2567 และเพิ่มขึ้นถึง 121.8kW ในวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2568 สรุปได้ว่าค่า Off-Peak Load มีการเพิ่มขึ้นจาก 100.3kW เป็น 121.8kW ซึ่งแสดงถึงการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่ไม่ใช่ช่วงพัก Load Factor คืออัตราส่วนระหว่างการใช้พลังงานเฉลี่ยกับการใช้พลังงานสูงสุดในช่วงเวลาเดียวกัน ค่า Load Factor เริ่มต้นที่ 0.85 ในวันที่ 1 ธันวาคม 2567 และเพิ่มขึ้นเป็น 0.94 ในวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2568 สรุปได้ว่าค่าการเพิ่มขึ้นของ Load Factor (จาก 0.85 เป็น 0.94) แสดงถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน โดยมีการใช้พลังงาน

สูงสุดและเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Load และ Off-Peak Load ค่า Peak Load และ Off-Peak Load มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งคู่ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานในระบบโดยรวม อย่างไรก็ตาม Peak Load มีการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าค่า Off-Peak Load แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานในช่วงพีค ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Load Factor) ค่า Load Factor ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้า โดยระบบเริ่มใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในช่วงพีคและนอกช่วงพีค

3.2.4 การวิเคราะห์แนวโน้มรายฤดูกาล (Seasonal Trends) เป้าหมายคือการวิเคราะห์ผลกระทบของฤดูกาล (เช่น ฤดูร้อน, ฤดูหนาว) ต่อการใช้พลังงาน โดยเฉพาะในช่วง Peak Load กระบวนการวิเคราะห์จะทำการแบ่งข้อมูลตามฤดูกาล (Spring, Summer, Fall, Winter) หรือแบ่งเป็นเดือน คำนวณ Peak Load และ Average Load ในแต่ละฤดูกาลหรือเดือน วิเคราะห์ผลกระทบของฤดูกาล เช่น ฤดูร้อนที่มีการใช้พลังงานมากกว่าฤดูหนาว ประโยชน์สามารถช่วยในการคาดการณ์ Peak Load ในแต่ละฤดูกาลและวางแผนการใช้งานพลังงานได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์พฤติกรรมโหลดไฟฟ้าและการใช้พลังงาน

Date (10-day intervals)	Peak Load (kW)	Off-Peak Load (kW)	TEC (kWh)	Load Factor
01-10/12/2567	151.3	78.6	255.2	0.59
11-20/12/2567	155.0	79.0	260.5	0.60
21-31/12/2567	157.6	81.4	263.6	0.60
01-10/01/2568	162.4	84.5	277.5	0.63
11-20/01/2568	164.4	83.7	279.9	0.63
21-31/01/2568	165.4	84.2	279.9	0.63
01-10/02/2568	158.8	80.6	265.0	0.61
11-20/02/2568	157.5	79.2	260.5	0.60
21-28/02/2568	163.3	84.0	277.8	0.63



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ผลกระทบของฤดูกาลต่อพฤติกรรมโหลดไฟฟ้าและการใช้พลังงาน

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า ความเปลี่ยนแปลงของ Peak Load (โหลดสูงสุด) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 151.3kW ในช่วงต้นเดือนธันวาคม ไปถึงจุดสูงสุดที่ 165.4kW ในช่วงปลายเดือนมกราคม 2568 (เพิ่มขึ้น 9.32%) หลังจากนั้นมีการลดลงเล็กน้อยในช่วงต้นถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ 2568 ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงปลายเดือน รูปแบบนี้สอดคล้องกับฤดูกาลในประเทศไทย โดยช่วงมกราคมมักเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอื่น ซึ่งอาจส่งผลต่อการใช้อุปกรณ์ทำความร้อนหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มของ Off-Peak Load (โหลดต่ำสุด) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับ Peak Load แต่ในอัตราที่น้อยกว่า เพิ่มขึ้นจาก 78.6kW ในช่วงต้นธันวาคม ไปถึง 84.5kW ในช่วงต้นมกราคม (เพิ่มขึ้น 7.51%) สัดส่วนระหว่าง Off-Peak Load และ Peak Load ค่อนข้างคงที่ ประมาณ 51-52% ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา ปริมาณการใช้พลังงานรวม (Total Energy Consumption) เพิ่มขึ้นจาก 255.2kWh เป็น 279.9kWh ในช่วงมกราคม (เพิ่มขึ้น 9.68%) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับค่า Peak Load แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดสูงสุดและปริมาณการใช้พลังงานรวม ค่า Load Factor (ตัวประกอบโหลด) เพิ่มขึ้นจาก 0.59 ในช่วงต้นธันวาคม 2567 เป็น 0.63 ในช่วงมกราคม 2568 การเพิ่มขึ้นของ Load Factor บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีขึ้น เนื่องจากมีการกระจายการใช้พลังงานที่สม่ำเสมอมากขึ้นระหว่างช่วง Peak และ Off-Peak

นัยสำคัญทางวิชาการและการประยุกต์ใช้

1. ค่า Load Factor ที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.63 ในเดือนมกราคมสะท้อนถึงการใช้กำลังการผลิตที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งช่วยลดต้นทุนต่อหน่วยพลังงานและลดความจำเป็นในการขยายกำลังการผลิตในอนาคต

2. ความแตกต่างระหว่าง Peak และ Off-Peak ที่คงที่แสดงถึงโอกาสในการปรับปรุงการจัดการโหลด เช่น การใช้ Demand Side Management (DSM) เพื่อลดช่องว่างระหว่าง Peak และ Off-Peak

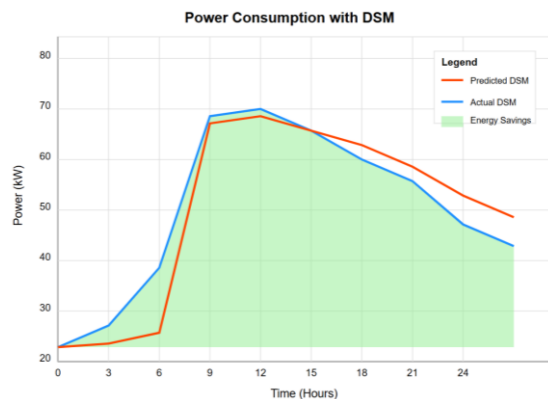
3. การเปลี่ยนแปลงระหว่างธันวาคมและมกราคมบ่งชี้ถึงผลกระทบจากสภาพอากาศหรือกิจกรรมทางธุรกิจ การทำความเข้าใจแนวโน้มนี้ช่วยในการวางแผนการผลิตและการจัดการพลังงาน

4. โอกาสในการอนุรักษ์พลังงาน ช่วง Peak Load สูงในปลายมกราคมเป็นช่วงที่ควรมุ่งเน้นการอนุรักษ์พลังงานเพื่อลดต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การลดลงของ Peak Load ในต้นกุมภาพันธ์อาจบ่งชี้ถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพหรือการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้พลังงาน

3.3 ผลกระทบของการจัดการด้านอุปสงค์พลังงาน (DSM) ต่อการใช้พลังงาน

การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับการกระจายโหลดพลังงาน (Load Balancing) หรือการจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า ตัวอย่างที่อาจจะอธิบายได้รวมถึง การปรับโหลดพลังงาน การประหยัดพลังงาน ผลกระทบจากการปรับโหลดพลังงาน ผลกระทบด้านการประหยัดพลังงาน การศึกษาผลของการปรับโหลดพลังงานและการประหยัดพลังงานจึงมีความสำคัญทั้งในแง่ของการลดการสูญเสียพลังงานและการลดค่าใช้จ่ายในการใช้

พลังงานในระยะยาว รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานของระบบไฟฟ้าในอาคารหรือโรงงาน



รูปที่ 6 แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารเรียน ภายใต้มาตรการ Demand Side Management (DSM)

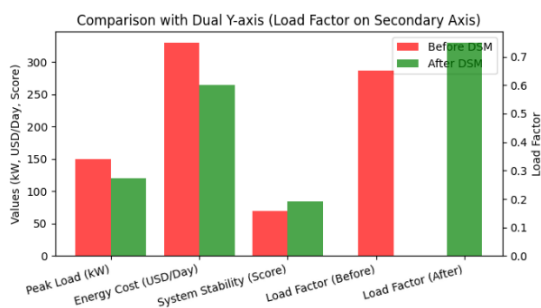
จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า แนวโน้มโหลดสูงสุด (Peak Load) ลดลง หลังจากใช้ DSM ซึ่งช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการพลังงานสูง DSM ช่วยกระจายโหลดให้เหมาะสม ทำให้พลังงานถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดความผันผวนของโหลด การประหยัดพลังงานเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน และค่า โดยสังเกตจากพื้นที่สีเขียวที่ปรากฏในช่วงที่พลังงานใช้งานสูง มาตรการ DSM นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการ ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารเรียน และช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาว

3.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังใช้กลยุทธ์ DSM

การนำระบบจัดการอุปสงค์พลังงาน (Demand-Side Management: DMS) มา ใช้ ส่งผล ให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าดีขึ้น

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังการนำกลยุทธ์การจัดการอุปสงค์พลังงาน (DSM)

Parameter	Before DSM	After DSM	Improvement (%)
Peak Load (kW)	150	120	20
Load Factor	0.65	0.75	15.40
Energy Cost (USD/Day)	330	264	20
System Stability (Score)	70	85	21.40



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบจัดการพลังงาน การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบโหลดบนแกนทุติยภูมิ

จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า หลังจากติดตั้งระบบ ESM สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าในอาคารได้หลายมิติ ดังนี้ Peak Load ลดลงจาก 150kW เหลือ 120kW หรือคิดเป็นการลดลง ร้อยละ 20 โดยระบบ ESM จัดการโหลดไฟฟ้าโดย เลื่อนเวลาการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังสูงไปยังช่วง Off-Peak และปรับการกระจายโหลดให้สมดุลระหว่างเฟส ทำให้ความต้องการพลังงานสูงสุดในช่วง Peak ลดลง Energy Cost ลดลงจาก 320 USD/วัน เป็น 250 USD/วัน หรือประมาณ 9,500 บาท/วัน (คำนวณตามอัตราแลกเปลี่ยน 1 USD ≈ 38 THB) คิดเป็นการประหยัด ร้อยละ 21.9 System Stability Score เพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 85 คะแนน แสดงถึงความมั่นคงของระบบที่สูงขึ้น หลังการใช้ ESM Load Factor เพิ่มขึ้นจาก 0.62 เป็น 0.78 หรือคิดเป็นการเพิ่มขึ้น ร้อยละ 25.8 แสดงถึงการ

ใช้กำลังไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพมากขึ้น สรุปเชิงเทคนิคได้ว่าการติดตั้งระบบ ESM ไม่เพียงช่วยลดค่า Peak Load และต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังปรับปรุงความเสถียรและประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าโดยรวมของระบบ ทำให้สามารถจัดการโหลดได้อย่างเหมาะสมทั้งในช่วงเวลาปกติและช่วง Peak

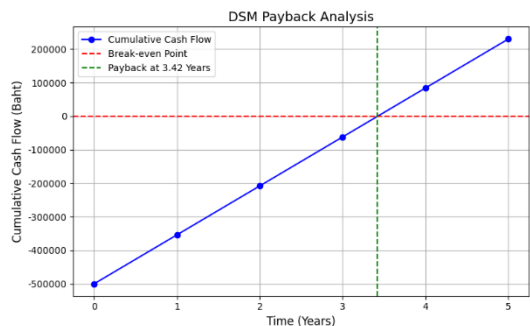
3.4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ ในการวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของ DSM สามารถใช้เกณฑ์ต่าง ๆ เพื่อวัดผลตอบแทนทางการเงินได้

ตารางที่ 5 ตารางวิเคราะห์ต้นทุนและผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของ DSM

รายการ	ค่าใช้จ่าย/ผลตอบแทน
ต้นทุนเริ่มต้น	500,000 บาท
ต้นทุนดำเนินการ	10,000 บาท/ปี
ต้นทุนแฝง	ขึ้นอยู่กับกรณี
การประหยัดพลังงาน	146,000 บาท/ปี
Payback Period	3.42 ปี
ROI	27.2% ต่อปี

จากตารางที่ 5 แสดงต้นทุนเริ่มต้น (Initial Cost) 500,000 บาท ประกอบด้วยอุปกรณ์ DSM (350,000 บาท), ค่าติดตั้ง (100,000 บาท) และซอฟต์แวร์พร้อมการฝึกอบรม (50,000 บาท) ต้นทุนดำเนินการ (Operating Cost) 10,000 บาท/ปี ครอบคลุมค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์และซอฟต์แวร์การประหยัดพลังงาน (146,000 บาท/ปี) มาจากการลด Peak Load และค่าไฟฟ้าในช่วง Off-Peak Payback Period = ต้นทุนเริ่มต้น ÷ (การประหยัดพลังงานต่อปี - ต้นทุนดำเนินการ) ≈ 3.42 ปี ROI (Return on Investment) = (ผลตอบแทนสุทธิรายปี ÷ ต้นทุนเริ่มต้น) × 100 ≈ 27.2% ต่อปี อัตราดอกเบี้ย ไม่ได้นำมาคำนวณในตัวอย่างนี้ แต่สามารถปรับใช้ Net

Present Value (NPV) หรือ Discounted Payback Period หากต้องการพิจารณาค่าเงินตามเวลา



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของ DSM

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า โครงการเริ่มต้นด้วยเงินลงทุนประมาณ 500,000 บาท (จุดติดลบสูงสุดที่ปีที่ 0) กระแสเงินสดสะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี (เส้นกราฟมีความชันบวก) แสดงว่าโครงการมีรายรับเข้ามาอย่างสม่ำเสมอ จุดคุ้มทุนเกิดขึ้นที่ประมาณ 3.42 ปี (จุดที่เส้นสีน้ำเงินตัดกับเส้นประสีแดง และมีเส้นประสีเขียวตั้งฉาก) หลังจากปีที่ 3.42 โครงการเริ่มสร้างกำไร โดยในปีที่ 5 มีกระแสเงินสดสะสมประมาณ 200,000 บาท สรุปได้ว่าโครงการ DSM นี้ใช้เวลาคืนทุน 3.42 ปี และหลังจากนั้นจะเริ่มสร้างผลกำไรให้กับผู้ลงทุน โดยภายในระยะเวลา 5 ปี จะสร้างกำไรสุทธิประมาณ 200,000 บาท

3.5 Demand Side Management: DSM

DSM คือการบริหารจัดการพลังงานฝั่งผู้ใช้ (เช่น อาคารและโรงงาน) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) และลดการสูญเสียพลังงาน โดยใช้แนวทางต่าง ๆ เช่น Behavioral Change (ปรับเปลี่ยนพฤติกรรม), Renewable Energy (พลังงานหมุนเวียน), Load Control (การควบคุมโหลด), Energy-Efficient Technology (เทคโนโลยีประหยัดพลังงาน) และ

Demand Response (การตอบสนองด้านอุปสงค์) เพื่อสร้างระบบพลังงานที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบเทคนิค DSM

DSM Technique	Description	Advantages	Disadvantages
Behavioral Change	Adjusting user habits	- Reduces peak load - Eases grid strain	- Hard to change habits - Low cooperation
Renewable Energy	Using solar/wind power	- Cuts fossil fuel use - Low emissions	- High cost - Intermittent supply
Load Control	Managing non-essential devices	- Reduces peak demand - Less grid load	- Affects comfort - Needs control
Energy-Efficient Tech	Using efficient appliances	- Saves energy - Lowers costs	- High cost - Durability issues
Demand Response	Adjusting load via signals	- Reduces peak demand	- Needs coordination - Real-time data required

จากตารางที่ 6 แสดงเทคนิค Demand-Side Management (DSM) มีหลายแนวทางที่ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดภาระของระบบไฟฟ้า โดยแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม กระตุ้นให้ผู้ใช้ปรับพฤติกรรมเพื่อลด Peak Load แม้มีต้นทุนต่ำแต่ต้องอาศัยแรงจูงใจและความร่วมมือสูง
2. พลังงานทดแทน ใช้พลังงานสะอาดเพื่อลดการพึ่งพาฟอสซิล แต่มีต้นทุนติดตั้งสูงและอาจไม่เสถียร
3. การควบคุมโหลด บริหารพลังงานโดยลดการใช้ในช่วงพีค ช่วยรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า แต่ต้องมีการจัดการที่เหมาะสม

4. เทคโนโลยีประหยัดพลังงาน ใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น หลอด LED แม้ช่วยลดค่าใช้จ่ายระยะยาว แต่มีต้นทุนเริ่มต้นสูง

5. Demand Response ปรับ โห ล ด ตาม สัญญาณจากผู้ให้บริการพลังงาน ลดภาระของระบบไฟฟ้า แต่ต้องใช้ข้อมูลเรียลไทม์และการประสานงานที่ดี

สรุปได้ว่าแต่ละเทคนิคของ DSM มีข้อดีและข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับบริบทของระบบไฟฟ้าและลักษณะการใช้พลังงานของผู้ใช้ ในการเลือกใช้แนวทางที่ดีที่สุด ควรพิจารณาทั้งต้นทุน ประสิทธิภาพ และความสะดวกของผู้ใช้งานเพื่อให้สามารถบริหารจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4. สรุป

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า แนวโน้มโหลดพลังงานสูงสุด (Peak Load) ของอาคารเรียนมีความคงที่ในระดับรายวันระหว่างวันทำการและวันหยุด แต่มีความผันผวนสูงในระดับรายสัปดาห์ โดยสูงสุดในช่วงต้นและท้ายของระยะเวลาเรียน และแนวโน้มรายเดือนสูงสุดอยู่ในเดือนธันวาคม 2567 และมกราคม 2568 และต่ำสุดในเดือนกุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการปรับการใช้พลังงาน (Demand Response Behavior) เช่น การเลื่อนเวลาใช้เครื่องปรับอากาศและการใช้ไฟฟ้าในช่วง Off-Peak การสังเกตนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยของ Panda et al. [1] และ Williams et al. [3] ซึ่งรายงานว่า อาคารและโรงงานที่ใช้ระบบ DSM มีแนวโน้มการลด Peak Load ผ่านการปรับพฤติกรรมผู้ใช้และการจัดสรรโหลดไปยังช่วง Off-Peak นอกจากนี้ Mayer et al. [5] พบว่า การใช้ DSM ในภาคอุตสาหกรรมช่วยสร้างความยืดหยุ่นต่อความผันผวนของโหลดไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่พบความแตกต่างของ Peak Load ในแต่ละช่วงเวลาของวันและเดือน ในขณะที่งานวิจัยของ Kanakadhurga [6] และ Ullah [7] เน้นการวิเคราะห์ DSM ใน Microgrid และผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายและการรวมพลังงานหมุนเวียน

การศึกษานี้ต่างออกไปตรงที่ใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดเรียลไทม์ในอาคารเรียน ทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ใช้และแนวโน้มการใช้พลังงานในระดับรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือนได้อย่างละเอียด นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังรวมการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยระบุค่า ROI และเวลาคืนทุน ซึ่งพบว่าเทคนิค DSM สามารถลด Peak Load ได้อย่างน้อย 10–15% และเพิ่ม Load Factor 5–8% ภายในระยะเวลา 3.42 ปี ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่ได้ระบุรายละเอียดเชิงตัวเลข KPI ในลักษณะนี้ [1], [4], [8]- [9]

สรุปได้ว่า ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวโน้มและเทคนิค DSM ที่รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ในเรื่องของการลด Peak Load และการปรับพฤติกรรมผู้ใช้ แต่มีความแตกต่างในแง่ของการใช้ข้อมูลเรียลไทม์และการประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเพิ่มความชัดเจนและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับอาคารเรียน [1]- [9]

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบ คุณ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณปี 2568 และอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ และบุคลากรที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวก รวมถึงครอบครัว และเพื่อนร่วมงานที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดกระบวนการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Panda, S. Mohanty, P. K. Rout, B. K. Sahu, S. M. Parida, I. S. Samanta, M. Bajaj, M. Piecha, V. Blazek, and L. Prokop, "A comprehensive review on demand side management and market design for

- renewable energy support and integration,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2228-2250, Nov. 2023.
- [2] A. H. Nebey, “Recent advancement in demand-side energy management system for optimal energy utilization,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5422–5435, 2024.
- [3] B. Williams, D. Bishop, P. Gallardo, and J. G. Chase, “Demand Side Management in industrial, commercial, and residential sectors: a review of constraints and considerations,” *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023.
- [4] A. T. Dahiru, D. Daud, C. W. Tan, Z. T. Jagun, S. Samsudin, and A. M. Dobi, “A comprehensive review of demand side management in distributed grids based on real estate perspectives,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, pp. 81984–82013, 2023.
- [5] P. Mayer, M. Heer, D. Y. Shu, N. Zielonka, L. Leenders, F. J. Baader, and A. Bardow, “Flexibility from industrial demand-side management in net-zero sector-coupled national energy systems,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024.
- [6] D. Kanakadhurga and N. Prabakaran, “Demand side management in microgrid: a critical review of key issues and recent trends,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, article 111915, 2022.
- [7] K. Ullah, J. Quanyuan, R. A. Khan, and W. Khan, “Impact of demand side management on the operational cost of microgrids using ABC algorithm,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 2023.
- [8] R. Elazab, A. T. Abdelnaby, and A. A. Ali, “Impacts of multiple demand-side management strategies on microgrids planning: a literature survey,” *Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 36-54, 2024.
- [9] Y. B. Elias, M. Y. Yousef, A. Mohamed, A. A. Ali, and M. A. Mosa, “Energy management and demand side management framework for nano-grid under various utility strategies and consumer’s preference,” *Scientific Reports*, vol. 14, no. 25757, 2024.

ผลของวัสดุปลูกและกรรมวิธีสำหรับดูแลต้นพืชระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลองของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง

อรรถพล ตลิ่งจิตร^{1,+} สุदारัตน์ ปาโมกษ์² นวันธร รุ่งเรือง² โรจนกร เชิงปัญญา³ และ อภิรดี เสี่ยงสืบชาติ^{2*}

¹ประธานกรรมการบริหารบริษัท Growth Revolution จำกัด

²สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ

³สาขาวิชาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ

⁺คุณอรรถพล ตลิ่งจิตร เสียชีวิตเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2567

¹150 ตำบลนางแล อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย 57100

^{2,3}17 หมู่ 3 ถนนยันตรกิจโกศล ตำบลแม่ทราย อำเภอร้องกวาง จังหวัดแพร่ 54140

รับบทความ 4 กันยายน 2567 แก้ไขบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2569 ตอบรับบทความ 2 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

ต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง (*Philodendron pedatum* (Hook.) Kunth) เป็นพืชที่นิยมใช้เป็นไม้ตัดใบและปลูกจัดสวนหรือปลูกเป็นไม้กระถางวางประดับในอาคาร เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจึงถูกใช้ในการขยายพันธุ์พืชเศรษฐกิจชนิดนี้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการนำไปใช้ที่สูงจากอุตสาหกรรมไม้ประดับ อย่างไรก็ตาม การนำต้นพืชจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อที่ชักนำให้เกิดรากในหลอดทดลองมาอนุบาลออกปลูกมักพบการตายของต้นพืช ซึ่งจัดเป็นการสูญเสียทรัพยากรในการผลิตพืชอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงทดสอบการชักนำการเกิดรากนอกหลอดทดลองของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง โดยนำยอดอ่อนในหลอดทดลองซึ่งสูง 1 เซนติเมตร และมีจำนวน 3 ใบ ไปเลี้ยงบนอาหารฐานสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog (MS) เปรียบเทียบกับต้นพืชในหลอดทดลองที่ถูกนำมาเลี้ยงนอกหลอดทดลองบนพีทมอส (10 ต้น/สภาวะ และทำซ้ำ 3 ครั้ง) จากการทดลองพบว่าต้นพืชทุกต้นที่เลี้ยงนอกหลอดทดลองสามารถมีชีวิตรอดและเกิดรากใหม่ได้ ทั้งยังให้จำนวนและความยาวของรากใหม่ และน้ำหนักสดโดยรวมของต้นพืชที่สูงกว่าต้นพืชที่เลี้ยงในหลอดทดลอง จากนั้นจึงศึกษาวัสดุปลูก (พีทมอส, โคโคพีท, พีทมอสผสมโคโคพีทในอัตราส่วน 1:1) และกรรมวิธีการใช้สารเคมี (น้ำกลั่น, อาหารเหลวสูตร MS, ฟลาโวเจน, ไอซัล) ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปลูกและดูแลต้นพืชระหว่างขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลอง (10 ต้น/ชุดการทดลอง และทำซ้ำ 3 ครั้ง) พบว่าการใช้พีทมอสเป็นวัสดุปลูกและการรดต้นพืชด้วยฟลาโวเจนซึ่งเป็นสารเคมีทางการเกษตรส่งผลให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตทั้งทางลำต้นและรากสูงที่สุด ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นการช่วยแก้ไขปัญหการตายของต้นพืชเมื่อนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง อีกทั้งสามารถช่วยลดต้นทุนการขยายพันธุ์ต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งด้วยเทคนิคเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ฟีโลเดนดรอน; การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช; การออกรากนอกหลอดทดลอง

Effects of Planting Media and Plant Care Practices on *Ex Vitro* Rooting of *Philodendron pedatum* (Hook.) Kunth

Auttapon Taluengjit^{1,†} Sudarat Pamok² Nawantorn Rungruang²
Rodjanacorn Chuengpanya³ and Apiradee Siangsuepchart^{2*}

¹Chief Executives Organization, Growth Revolution CO., LTD.

²Department of Agro-Industrial Biotechnology, Maejo University Phrae Campus

³Department of Agroforestry, Maejo University Phare Campus

[†]Mr. Auttapon Taluengjit passed away on 17 October 2024

¹150, Nang Lae Subdistrict, Mueang Chiang Rai District, Chiang Rai, 57100

^{2,3}17 Moo 3, Yantrakit Koson Road, Mae Sai Subdistrict, Rong Kwang District, Phrae, 54140

Received 4 September 2024; Revised 9 February 2026; Accepted 2 March 2026

Abstract

Philodendron pedatum (Hook.) Kunth is widely used as an ornamental plant for cutting leaf, gardening, or pot plant to decorate buildings. The plant tissue culture technique is employed to propagate this economically important crop for the high demand of the ornamental plant industry. However, the transplantation of *in vitro* rooted plants frequent results in plant death, which is causing a significant huge loss in plant propagation resource. This research aimed to evaluate the *ex vitro* rooting induction of *P. pedatum*. *In vitro* young shoots, 1 cm in height with 3 leaves, were cultured on Murashige and Skoog (MS) agar medium and compared with *in vitro*-raised plants grown under *ex vitro* conditions on peat moss (10 plants/condition with 3 times repeated). The results showed that all plants grown *ex vitro* were able to survive and rooting. Additionally, *ex vitro* plants exhibited data of new root number, new root length, and overall fresh weight significantly higher than *in vitro* plants. Planting media (peat moss, coco peat, a mixture of 1 peat moss : 1 coco peat) and plant care substance application (distilled water, MS liquid medium, Flavogen[®], Osil[®]) were subsequently studied to identify the most suitable substrate for *ex vitro* rooting (10 plants/treatment with 3 times repeated). The findings revealed that using peat moss as the planting material combined with Flavogen[®], an agrochemical, as the plant care substance resulted in the highest shoots and roots growth. This research will solve the problem of plant death after transplantation and could help reduce the cost of propagating *P. pedatum* using plant tissue culture techniques.

Keywords : *Philodendron*; Plant tissue culture; *Ex vitro* rooting

* Corresponding Author. Tel.: +668 9635 4224, E-mail Address: siangsuepchart.apiradee@gmail.com

1. บทนำ

ฟีโลเดนดรอนเป็นสกุลของพืชในวงศ์ Araceae ที่มีรูปร่างหลากหลาย บางชนิดมีใบสีสนและลวดลายที่สวยงาม จึงมักนิยมใช้เป็นไม้ตัดใบหรือปลูกประดับตกแต่งสวนและอาคาร ทั้งยังสร้างมูลค่าจากการส่งออกได้ไม่ต่ำกว่า 15 ล้านบาท [1] พืชสกุลนี้มีความต้องการจากตลาดไม้ประดับที่สูง จึงมีการนำฟีโลเดนดรอนชนิดต่าง ๆ มาใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของผู้ค้าขายพืชแต่ละรายและเพื่อตอบสนองต่ออุปสงค์ของผู้บริโภคที่มักให้ความสนใจแก่ต้นพืชที่มีลักษณะสวยงามและแปลกตาอยู่เสมอ ปัจจุบันพบว่าต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Philodendron pedatum* (Hook.) Kunth)) เป็นฟีโลเดนดรอนอีกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและมีความต้องการจากตลาดไม้ประดับที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพืชชนิดนี้มีลักษณะของใบสวยงามแปลกตา ต้องการปริมาณน้ำปานกลางและแสงแดดรำไร [2] ทำให้ปลูกเลี้ยงได้ง่าย ต้นที่เจริญเติบโตสมบูรณ์เต็มที่มีราคาขายในท้องตลาดไม่ต่ำกว่า 500 บาท ขณะที่ต้นซึ่งมีลวดลายหรือใบด่างจะมีราคาสูงกว่าปกติ ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการจากอุตสาหกรรมไม้ประดับให้ได้อย่างต่อเนื่อง เทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจึงถูกนำมาใช้ในการขยายพันธุ์พืชเศรษฐกิจชนิดนี้ เนื่องจากวิธีการนี้สามารถผลิตต้นพืชได้เป็นจำนวนมากกว่าการขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเมล็ด การปักชำหรือการแยกหน่อ สามารถเพิ่มปริมาณต้นพืชได้ตลอดทั้งปีโดยไม่ขึ้นกับฤดูกาล พืชต้นใหม่ที่ได้เป็นพืชปลอดโรคและตรงตามพันธุ์ [3]

การนำต้นพืชที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อไปใช้ประโยชน์ต่อด้านต่าง ๆ จำเป็นต้องนำต้นพืชมาอนุบาลออกปลูกนอกหลอดทดลอง เพื่อให้ต้นพืชปรับสภาพโครงสร้างภายใน เช่น การทำงานของปากใบ การสังเคราะห์ด้วยแสง ให้คล้ายคลึงกับต้นพืชในสภาพธรรมชาติ [4] ทั้งนี้ในระหว่างขั้นตอนการออกปลูกมักพบการตายของต้นพืช เช่น ต้น *Chlorophytum borivilianum* มีอัตราการรอดชีวิตเพียง 15% หลังจาก

นำต้นพืชที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อไปออกปลูกนอกหลอดทดลอง [5] อันเป็นผลจากการฉีกขาดของรากระหว่างการล้างอาหารวันสังเคราะห์ที่ใช้เลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลองซึ่งติดอยู่ที่บริเวณราก หรือเกิดการบอบช้ำของรากระหว่างนำต้นพืชปลูกลงในวัสดุปลูก รากที่เกิดขึ้นในหลอดทดลองมักมีลักษณะอวบหนาและเปราะหักหรือเสียหายได้ง่ายระหว่างการนำออกปลูก [6], [7] อีกทั้งรากไม่ค่อยแตกแขนงและมีขนรากน้อย ทำให้ดูดซับอาหารจากวัสดุปลูกได้ไม่ดี [8] มีการศึกษาที่พบว่าการเชื่อมต่อกันของระบบท่อลำเลียง (vascular tissue) ในส่วนต้นและรากของต้นพืชที่มาจาก การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมักไม่แข็งแรงซึ่งเป็นผลจากเซลล์ในระบบท่อลำเลียงมีรูปร่างที่ผิดปกติ [4] ทำให้การดูดและขนส่งน้ำ/ธาตุอาหารในต้นพืชไม่ค่อยดี รากที่เกิดขึ้นในหลอดทดลองยังมีพัฒนาการของเนื้อเยื่อท่อลำเลียงที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับต้นพืชในธรรมชาติ โดยรากเหล่านี้กว่า 50% จะตายหรือชะงักการเจริญเติบโตเมื่อนำต้นพืชออกปลูกนอกหลอดทดลอง [9] ลักษณะรากที่ผิดปกติทั้งทางด้านสัณฐานวิทยาและกายวิภาคเหล่านี้จะส่งผลให้ต้นพืชตายในที่สุด ซึ่งเป็นการสูญเสียสารเคมี เวลาและแรงงานในกระบวนการผลิตพืชเศรษฐกิจจอย่างยิ่ง งานวิจัยการผลิตพืชเศรษฐกิจบางชนิดจึงชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองเพื่อป้องกันการสูญเสียทรัพยากรดังกล่าว ต้นพืชที่เกิดรากนอกหลอดทดลองมีอัตราการรอดชีวิตรวมถึงการเจริญเติบโตทางด้านต้นและรากที่สูงกว่าต้นพืชที่เกิดรากในหลอดทดลองแล้วจึงค่อยนำออกปลูก [7], [10] เนื่องจากการเกิดรากนอกหลอดทดลองเป็นการลดความเสียหายที่จะเกิดแก่รากต้นพืชระหว่างการล้างรากหรือการนำลงปลูก อีกทั้งรากที่เกิดนอกหลอดทดลองจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาคที่ใกล้เคียงกับรากต้นพืชในสภาพธรรมชาติ [4], [7], [9] การเกิดรากนอกหลอดทดลองยังทำให้ต้นทุนการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชลดลงอีกด้วยเพราะทำให้ขั้นตอนการออกรากและการออกปลูกเกิดขึ้นไปพร้อมกัน

ขั้นตอนเดียว ซึ่งได้มีผู้รายงานว่า การนำต้นชา (*Camellia sinensis*) มาออกรากนอกหลอดทดลอง ช่วยลดต้นทุนการเพิ่มปริมาณพืชชนิดนี้ด้วยวิธีเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อได้สูงถึง 71% [11] ดังนั้นความสามารถในการออกรากนอกหลอดทดลองของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการศึกษ เพื่อให้พืชเศรษฐกิจชนิดนี้มีอัตราการตายที่ต่ำหลังจากนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง ผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการออกรากนอกหลอดทดลองของพืชสกุลฟีโลเดนดรอนที่มีการศึกษาค่อนข้างจำกัดได้อีกด้วย

วัสดุปลูกเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การออกรากนอกหลอดทดลองและต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม เนื่องจากวัสดุปลูกแต่ละชนิดมีปริมาณธาตุอาหาร, ความพรุนและความร่วนซุย, ความสามารถในการกักเก็บและระบายน้ำ, ค่า pH และความสะอาดที่แตกต่างกัน [12] จึงทำให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตทางยอดและรากที่ต่างกัน [13] พีทมอส (peat moss) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในขั้นตอนการนำต้นฟีโลเดนดรอนที่เกิดรากในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อออกปลูกนอกหลอดทดลองดังที่พบในหลายรายงาน [14] - [16] โดยใช้เป็นวัสดุเดี่ยวหรือผสมร่วมกับเพอร์ไลต์ (perlite) สาเหตุที่พีทมอสนิยมใช้เป็นวัสดุปลูกแก่ต้นฟีโลเดนดรอนที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่ออาจเป็นเพราะมีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่สัมผัสมาก จึงสามารถกักเก็บอาหารและน้ำได้สูง [17] - [18] ส่งผลให้สนับสนุนการเจริญเติบโตของต้นพืชได้ดี พีทมอสยังสามารถนำไปนึ่งฆ่าเชื้อก่อนนำไปใช้ปลูกพืชได้อีกด้วย [14] - [15] วัสดุจึงมีความสะอาดและช่วยป้องกันการเกิดโรคพืชระหว่างขั้นตอนการออกปลูกได้ ขุยมะพร้าวละเอียดหรือโคโคพีท (cocopeat) เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายพีทมอสและนิยมใช้เป็นวัสดุปลูกสำหรับการขยายพันธุ์ต้นฟีโลเดนดรอนด้วยการปักชำ [19] หากแต่การนำโคโคพีทมาเป็นวัสดุปลูกแก่ต้นฟีโลเดนดรอนที่เกิดรากในหลอดทดลองยังไม่

ค่อยแพร่หลายมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับพีทมอส โดยพบรายงานการใช้โคโคพีทเป็นวัสดุปลูกเพียงในต้นฟีโลเดนดรอนเบอร์กิน (*Philodendron* cv. Birkin) [20] ทั้งนี้วัสดุทั้ง 2 ชนิดยังไม่พบรายงานการนำมาใช้ปลูกพืชสกุลฟีโลเดนดรอนระหว่าง การออกรากนอกหลอดทดลอง ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพของพีทมอสและโคโคพีทจึงควรต้องมีการศึกษาเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุปลูกระหว่างการเกิดรากนอกหลอดทดลองของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ วัสดุปลูกที่เหมาะสมยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มรากเพื่อเตรียมต้นพืชเข้าสู่กระบวนการขนส่งสำหรับจำหน่ายในระดับประเทศหรือต่างประเทศได้อีกด้วย

การนำต้นพืชจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมาออกรากนอกหลอดทดลองนั้น จำเป็นต้องดูแลต้นพืชโดยให้ปุ๋ยหรืออาหารเสริมเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนให้ต้นพืชมีการเจริญของรากเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งหากรากมีการพัฒนาที่สมบูรณ์และแข็งแรงก็จะสามารถดูดซับน้ำและแร่ธาตุได้ดี ส่งผลต่อเนื่องให้การพัฒนาด้านต้นแข็งแรง การศึกษาของ Zhou *et al.* [13] พบว่าการรดอาหารเหลวสังเคราะห์สูตร Murashige และ Skoog (MS) เพิ่มเติมให้แก่ต้นพืชขณะออกรากนอกหลอดทดลองส่งผลให้ต้นพืชมีความสูงและน้ำหนักโดยรวมที่มากกว่าการรดด้วยน้ำเปล่า และเมื่อรดต้นพืชด้วยอาหารเหลวสังเคราะห์สูตร MS ที่ผสมสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มออกซินชนิดกรดแนฟทาลีนอะซีติก (1-naphthaleneacetic acid : NAA) เข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ต้นและรากมีการเจริญเติบโตในภาพรวมที่สูงสุด Manokari *et al.* [21] ได้ชักนำให้ต้น *Vanilla planifolia* เกิดรากนอกหลอดทดลองด้วยการนำยอดอ่อนไปจุ่มในสารละลาย NAA ที่ความเข้มข้นสูงถึง 100 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่ Benmahiou *et al.* [22] ได้นำสารเคมีเร่งรากทางการเกษตร (Rootone F® และ Rhizopon AA®) มาชักนำให้ยอดอ่อนของถั่วพิสตาชิโอ (*Pistacia vera*) เกิดรากนอกหลอดทดลอง จากข้างต้น

จะเห็นว่าการชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองในงานวิจัยแต่ละรายงานได้ใช้วิธีและความเข้มข้นของสารเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาผลของสารเคมีชนิดใหม่ ๆ ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชโลเดนดรอนก้ามกุ้งระหว่างขั้นตอนการเกิดรากนอกกระป๋องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้ได้เลือกสารเคมีทางการเกษตรมาศึกษาจำนวน 2 ชนิด คือ ฟลาโวเจน (Flavogen®) (เวลด์ โกรว์, ประเทศไทย) และโอซิล (Osil®) (เกษตรอัจฉริยะ, ประเทศไทย) เคมีภัณฑ์เหล่านี้มีราคาไม่สูงมากและสามารถหาซื้อได้ง่ายจากร้านจำหน่ายอุปกรณ์ทางการเกษตรหรือร้านค้าออนไลน์ ผลการทดลองที่ได้อาจสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการดูแลพืชสกุลพืชโลเดนดรอนระหว่างขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลองหรือการนำต้นพืชที่เกิดรากในหลอดทดลองมาออกปลูกได้

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยพัฒนาการขยายพันธุ์ต้นพืชโลเดนดรอนก้ามกุ้งด้วยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยป้องกันการตายของต้นพืชที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการนำต้นพืชออกปลูกนอกหลอดทดลอง และช่วยเป็นข้อมูลพื้นฐานในการลดต้นทุนการผลิตพืชเศรษฐกิจชนิดนี้ ทั้งยังอาจเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสกุลพืชโลเดนดรอนชนิดอื่น ๆ ได้ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมพืชทดลอง

เพิ่มปริมาณพืชทดลองด้วยการนำต้นพืชโลเดนดรอนก้ามกุ้งปลอดเชื้อในหลอดทดลองมาตัดแยกเอาส่วนโคนลำต้นขนาด 1 เซนติเมตร ไปเลี้ยงบนอาหารวุ้นสังเคราะห์สูตร MS [23] (PhytoTech Labs, USA) ที่มีน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 30 กรัม/ลิตร, เจลไรท์ (gelrite) (Sigma, USA) เข้มข้น 2 กรัม/ลิตร, เบนซิลอะดีนีน (N^6 -benzyladenine : BA) (Siama, USA) เข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และ NAA (Siama, USA) เข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าความเป็นกรด

- ต่าง (pH) ของอาหารอยู่ที่ 5.7-5.8 ภาชนะที่ใช้เลี้ยงต้นพืชในขั้นตอนนี้ คือ ขวดแก้วขนาด 4 ออนซ์ ซึ่งบรรจุอาหารวุ้นสังเคราะห์ปริมาณ 20 กรัม เลี้ยง 1 ชั้นพืช/ขวดแก้ว

อาหารสำหรับเลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลองรวมถึงวัสดุปลูกต้นพืชนอกหลอดทดลองได้ถูกทำให้ปลอดเชื้อด้วยการนึ่งในหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (autoclave) ที่ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว นาน 15 นาที สภาวะที่ใช้เลี้ยงต้นพืชทั้งในและนอกหลอดทดลองตลอดการศึกษานี้ คือ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ จากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์แสงสีขาว ต้นพืชได้รับแสงไฟนาน 18 ชั่วโมง/วัน

2.2 การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นพืชในขั้นตอนการออกรากเปรียบเทียบระหว่างการเลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลองหรือนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง

หลังจากเลี้ยงส่วนโคนลำต้นบนอาหารวุ้นสังเคราะห์สูตร MS ที่มี BA 1 มิลลิกรัม/ลิตร ร่วมกับ NAA 1 มิลลิกรัม/ลิตร ครบ 8 สัปดาห์ (เปลี่ยนย้ายขึ้นพืชสู่อาหารใหม่ทุก 4 สัปดาห์) นำยอดอ่อนในหลอดทดลองที่ได้มาตัดแยกเป็นยอดเดี่ยวให้มีความสูง 1 เซนติเมตร และมีจำนวนใบ 3 ใบ แล้วนำไปศึกษาการเจริญเติบโตระหว่างการเลี้ยงยอดอ่อนต่อในหลอดทดลองเปรียบเทียบกับการนำยอดอ่อนออกปลูกนอกหลอดทดลอง

การเลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลอง : ยอดอ่อนถูกนำไปเลี้ยงในกระปุกพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 เซนติเมตร และความสูง 6.5 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุอาหารวุ้นสังเคราะห์สูตร MS ปริมาณ 150 กรัม ปิดฝากระปุกพลาสติกตลอดการเลี้ยงขึ้นพืช

การนำต้นพืชออกปลูกนอกหลอดทดลอง : นำยอดอ่อนไปล้างด้วยน้ำประปาเพื่อขจัดเศษวุ้นจากอาหารสังเคราะห์สูตร MS ที่อาจติดมาด้วย จากนั้นจึงนำยอดอ่อนไปเลี้ยงในกระปุกพลาสติกที่มีขนาดเช่นเดียวกับการ

เลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลอง แต่ละกระปุกบรรจุพีทมอส ปริมาณ 150 กรัม กันกระปุกได้เจาะรูขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 15 รู สำหรับระบายน้ำ การเลี้ยงยอดอ่อนในสภาวะนี้จะไม่ปิดฝากระปุกพลาสติก หากแต่กระปุกแต่ละอันจะถูกวางในกล่องพลาสติกซึ่งมีความกว้าง 24.3 เซนติเมตร x ความยาว 33.5 เซนติเมตร x ความสูง 13 เซนติเมตร ที่ปิดฝากล่องให้สนิท หลังจากนำยอดอ่อนปลูกลงในพีทมอสจึงให้น้ำกลั่นแก่ต้นพืช โดยให้น้ำผ่านทางกันกระปุกจนน้ำซึมขึ้นมาถึงผิวของวัสดุปลูก ดำเนินการให้น้ำแก่ยอดอ่อนสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

2.3 การศึกษาวัสดุปลูกที่เหมาะสมระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง

นำยอดอ่อนในหลอดทดลองที่ได้จากขั้นตอน 2.1 มาจัดเตรียมและตัดเป็นยอดเดี่ยวให้มีขนาดและจำนวนใบตามที่ระบุในขั้นตอน 2.2 จากนั้นนำยอดอ่อนเหล่านี้ออกปลูกลงนอกหลอดทดลองโดยปลูกในกระปุกพลาสติกที่บรรจุพีทมอส (วายุ.วิ.พี. อินเทอร์เน็ต, ประเทศไทย), โคโคพีท (โกรว์ พลัส, ประเทศไทย) และพีทมอสผสมโคโคพีทในอัตราส่วน 1:1

ขนาดและการเตรียมกระปุกพลาสติก ปริมาณของวัสดุปลูกในกระปุกพลาสติก การวางกระปุกพลาสติกในกล่องพลาสติก รวมถึงการให้น้ำแก่ต้นพืชดำเนินการคล้ายคลึงกับการนำต้นพืชออกปลูกลงนอกหลอดทดลองตามที่ระบุในขั้นตอน 2.2

2.4 การศึกษากรรมวิธีการดูแลต้นพืชระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง

ดำเนินการเตรียมยอดอ่อนตามที่ระบุในขั้นตอน 2.1 และ 2.2 นำยอดอ่อนไปปลูกในกระปุกพลาสติกที่บรรจุพีทมอสเป็นวัสดุปลูก ทั้งนี้การเตรียมและการวางกระปุกพลาสติก ปริมาณของวัสดุปลูกและการรดน้ำแก่ยอดอ่อนดำเนินการเหมือนกับการนำต้นพืชออกปลูกลงนอกหลอดทดลองดังที่ระบุในขั้นตอน 2.2

สารเคมีที่ใช้รดต้นพืชในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย น้ำกลั่น, อาหารเหลวสังเคราะห์สูตร MS (PhytoTech Labs, USA) และสารเคมีทางการเกษตร 2 ชนิด คือ ฟลาโวนเจน (เวิลด์ โกรว์, ประเทศไทย) และโอซิล (เกษตรอัจฉริยะ, ประเทศไทย) การเตรียมสารเคมีแต่ละชนิดดำเนินการดังนี้ คือ 1) ชั่งผงอาหารสังเคราะห์สูตร MS (PhytoTech Labs, USA) 4.43 กรัม มาละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร โดยที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครสเหมือนการเตรียมอาหารวัน ปรับ pH ให้มีค่าที่ 5.7 – 5.82) นำฟลาโวนเจนมาละลายด้วยน้ำกลั่น ซึ่ง working concentration ของฟลาโวนเจนกรณีใช้เป็นสารชุบหรือรดต้นพืชสำหรับพืชทุกชนิดอยู่ที่ 0.0001% (ปริมาตร/ปริมาตร) และ 3) นำโอซิลมาละลายด้วยน้ำกลั่น ซึ่ง working concentration ของโอซิลกรณีใช้รดต้นพืชอยู่ที่ 0.001% (ปริมาตร/ปริมาตร)

เมื่อนำยอดอ่อนปลูกลงในพีทมอสและรดน้ำแล้ว จึงรดสารเคมีที่บริเวณโคนลำต้นจำนวนต้นละ 1 มิลลิลิตร จากนั้นจึงรดให้สารเคมีอีกสัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยรดหลังจากที่ดำเนินการให้น้ำแก่ต้นพืชแล้ว

2.5 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) โดยแต่ละวิธีใช้จำนวน 10 กระปุกพลาสติก และเลี้ยงยอดอ่อนจำนวน 3 ยอด/1 กระปุกพลาสติก (จำนวนยอดอ่อนรวม 30 ยอด/1 วิธี) ในขั้นตอนที่ 2.2 – 2.4 ดำเนินการบันทึกข้อมูลหลังจากเลี้ยงขึ้นพืชครบ 8 สัปดาห์ โดยนำต้นพืชมาล้างน้ำเบา ๆ ให้สะอาดเพื่อชั่งตวงหรือวัสดุปลูกที่ติดบริเวณรากออก นำต้นพืชไปฝังบนกระดาษชำระนาน 5 นาที เพื่อให้ต้นพืชแห้ง แล้วบันทึกข้อมูล (ตารางที่ 1 - 3) ทั้งนี้ความยาวของรากใหม่วัดจากรากที่ยาวที่สุดของต้นพืชแต่ละต้น

การทดลองในขั้นตอนที่ 2.2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการทดสอบที (T-test) ขณะที่การทดลองในขั้นตอนที่ 2.3

และ 2.4 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการหาความแปรปรวนทางเดียว (one-way analysis of variance) จากการทดสอบเอฟ (F-test) ซึ่งหากการทดสอบพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้อมูลถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) การทดสอบทางสถิติตลอดการศึกษานี้วิเคราะห์ที่ระดับ $p < 0.05$ ด้วยโปรแกรม PASW Statistics 18.0 ข้อมูลแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : S.D.)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การเจริญเติบโตของต้นพืชในขั้นตอนการออกรากเปรียบเทียบระหว่างการเลี้ยงต้นพืชในหลอดทดลองหรือนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง

พืชหลายชนิดสามารถชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองได้ดังที่ปรากฏในงานวิจัยหลายรายงาน [7], [10]-[11], [13], [21] - [22] อย่างไรก็ตาม พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางพันธุกรรมที่ต่างกัน ซึ่งพืชบางชนิดไม่สามารถชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองได้ จึงจำเป็นต้องชักนำให้เกิดรากในหลอดทดลองแล้วค่อยนำออกปลูก [5] ดังนั้นการศึกษาด้านฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อสามารถชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองได้หรือไม่จึงเป็นสิ่งสำคัญ

เมื่อเลี้ยงต้นพืชจนครบ 8 สัปดาห์ งานวิจัยนี้พบว่ายอดอ่อนของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งทุกยอดสามารถพัฒนาให้ใบและรากใหม่ได้จากการเลี้ยงทั้งในสภาวะในหรือนอกหลอดทดลอง ทั้งยังไม่พบการตายของยอดอ่อนที่นำมาชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลอง ผลการศึกษายังพบว่ายอดอ่อนที่นำมาชักนำให้เกิดรากนอกทดลองให้จำนวนและความยาวของรากใหม่ (2.33 ราก/ต้น, 2.78 เซนติเมตร) ที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสภาวะในหลอดทดลอง (2.13 ราก/ต้น, 1.13 เซนติเมตร) รากใหม่ที่เกิดนอกหลอดทดลองยังมีลักษณะ

คล้ายคลึงกับต้นพืชที่เติบโตในสภาพธรรมชาติ กล่าวคือ รากมีความเหนียว มีการแตกแขนงและมีขนราก ขณะที่รากซึ่งเกิดในหลอดทดลองมีลักษณะสั้น อวบหนา หากแต่เปราะและหักง่าย รากไม่มีการแตกแขนงและพบขนรากน้อย (รูปที่ 1) การที่รากในหลอดทดลองมีลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและอาหารด้อยกว่ารากที่ชักนำให้เกิดนอกหลอดทดลอง จึงกระทบต่อการเจริญเติบโตทางต้น ส่งผลให้น้ำหนักสดของต้นพืชในหลอดทดลอง (0.14 กรัม) มีน้ำหนักที่ต่ำกว่าต้นพืชนอกหลอดทดลอง (0.23 กรัม) ผลการทดลองพบว่าความสูงของต้นพืชและจำนวนใบใหม่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการเลี้ยงต้นพืชทั้งใน 2 สภาวะ แต่การชักนำให้ต้นพืชเกิดรากนอกหลอดทดลองอาจมีแนวโน้มให้ความสูงต้นและจำนวนใบใหม่ที่สูงกว่าการเกิดรากในหลอดทดลอง (ตารางที่ 1, รูปที่ 1) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาในต้น *Siratia grosvenorii* [7] และสตรอเบอร์รี่ [10] ที่พบว่าการเกิดรากนอกหลอดทดลองให้ลักษณะรากที่คล้ายคลึงกับต้นพืชที่ปลูกในธรรมชาติ และให้การเจริญเติบโตทางด้านต้นและรากที่สูงกว่าต้นพืชที่ชักนำให้เกิดรากในหลอดทดลอง ทั้งยังให้อัตราการรอดชีวิตที่สูงกว่าด้วย การที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรากในหลอดทดลองมีลักษณะผิดปกติไปจากธรรมชาติเป็นผลจากลักษณะของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้เลี้ยงต้นพืชในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมักมีความพรุน (porosity) ที่ต่ำ [7] เมื่อเปรียบเทียบกับพีทมอสที่มีความพรุนสูงถึง 97% [17] จึงเอื้อต่อการเจริญเติบโตของรากมากกว่า ผลการทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการบ่งชี้ว่าต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งสามารถชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองได้ ซึ่งอาจช่วยป้องกันการตายของต้นพืชเมื่อนำออกปลูกโดย 1) การทำให้รากมีลักษณะปกติ และ 2) ลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อรากขณะนำออกปลูก ทั้งยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนและทำให้การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเสร็จสิ้นได้ไวขึ้นเพราะทำให้ขั้นตอนการออกรากและการออกปลูกเกิดไปพร้อมกันในขั้นตอนเดียว

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของต้นพืชในขั้นตอนการออกรากเปรียบเทียบระหว่างต้นพืชที่เลี้ยงในหลอดทดลองหรือนำออกปลูกนอกหลอดทดลอง ผลการทดลองบันทึกที่ 8 สัปดาห์

การเจริญเติบโตทางด้านต้นและใบ			
สภาวะการปลูก	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวนใบใหม่/ต้น	น้ำหนักสดต้นพืช (กรัม)
ในหลอดทดลอง	2.14±0.16	2.33±1.27	0.14±0.04
นอกหลอดทดลอง	2.39±0.34	2.36±0.84	0.23±0.09
T-test	N.S.	N.S.	*
การเจริญเติบโตทางด้านราก			
สภาวะการปลูก	จำนวนรากใหม่/ต้น	ความยาวรากใหม่ (เซนติเมตร)	
ในหลอดทดลอง	2.13±0.65	1.13±0.36	
นอกหลอดทดลอง	2.33±0.27	2.78±0.88	
T-test	*	*	

หมายเหตุ : N.S. คือ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ * คือ พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองวิเคราะห์ที่ระดับ $p < 0.05$

3.2 วัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ระหว่างขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลอง

พีทมอสและโคโคพีทเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการออกรากและอนุบาลต้นฟิลิเดนดรอนที่เกิดรากในหลอดทดลอง [14] - [16], [20] หากแต่ยังไม่พบรายงานการนำวัสดุ 2 ชนิดนี้ มาใช้เป็นวัสดุปลูกสำหรับการออกรากนอกหลอดทดลองของพืชสกุลฟิลิเดนดรอนประสิทธิภาพของวัสดุปลูกทั้ง 2 ชนิด ทั้งในรูปแบบเดี่ยวหรือใช้ผสมรวมกันต่อการเลือกใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสมในขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลองของต้นฟิลิเดนดรอนก้ามกุ้งจึงได้รับการศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการทดลองพบว่าต้นพืชทุกต้นสามารถรอดชีวิตและเจริญให้ใบและรากใหม่ได้ การใช้พีทมอสเป็นวัสดุปลูกส่งผลให้ต้นพืชมีความสูงต้น (2.61 เซนติเมตร), จำนวนใบใหม่ (2.77 ใบ/ต้น), น้ำหนักสดต้นพืช (0.26 กรัม) และจำนวนรากใหม่ (2.67 ราก/ต้น) สูงที่สุด ขณะที่การใช้โคโคพีทเป็นวัสดุปลูกกลับส่งผลให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตทั้งด้านต้น (ความสูงต้น 2.23 เซนติเมตร, จำนวนใบใหม่ 1.30 ใบ/ต้น, น้ำหนักสดต้นพืช 0.10 กรัม)

และราก (จำนวนรากใหม่ 1.10 ราก/ต้น, ความยาวรากใหม่ 1.55 เซนติเมตร) ที่ต่ำสุด (ตารางที่ 2, รูปที่ 1) เมื่อนำพีทมอสใช้ผสมร่วมกับโคโคพีท พบว่าต้นพืชมีการเจริญเติบโตทางลำต้นและรากที่ดีขึ้นกว่าการใช้โคโคพีทเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียว โดยวัสดุปลูกนี้ให้รากใหม่ที่ยาวถึง 3.85 เซนติเมตร หากแต่ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความยาวรากใหม่ของต้นพืชที่ปลูกในพีทมอส (3.04 เซนติเมตร) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากข้อมูลการทดลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า พีทมอสเป็นวัสดุปลูกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในขั้นตอนระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลองของต้นฟิลิเดนดรอนก้ามกุ้ง ทั้งนี้ Thảo et al. [16] พบว่า การนำต้น *Philodendron hederaceum* “Lemon Lime” ที่เกิดรากในหลอดทดลองไปออกปลูกบนวัสดุพีทมอสให้อัตราการรอดชีวิตทั้งหมด (100%), จำนวนใบ (2.37 ใบ/ต้น) และความสูงของยอด (2.92 เซนติเมตร) สูงสุด ขณะที่การใช้ขุยมะพร้าวให้ผลการทดลองต่ำที่สุด

มีผู้ศึกษาคูณสมบัติของพีทมอสในการใช้เป็นวัสดุปลูกพบว่าพีทมอสมีค่าความร่วนซุยที่ 97% และ

สามารถอุ้มน้ำได้มากกว่าน้ำหนักของพีทมอสเอง (water holding capacity) 10 - 30 เท่า [18] - [19] ขณะที่โคโคพีทมีค่าความร่วนซุยที่ 79% และสามารถอุ้มน้ำได้มากกว่าน้ำหนักของโคโคพีทเองประมาณ 9 เท่า [24] แม้วัสดุปลูกทั้ง 2 ชนิดจะมีความร่วนซุยที่สูงซึ่งสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดี อันเป็นสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของราก แต่จากการที่พีทมอสมีความสามารถในการกักเก็บความชื้นได้สูงกว่าโคโคพีท

จึงอาจทำให้เกิดสภาวะความชื้นในวัสดุปลูกที่เอื้อต่อการออกรากนอกหลอดทดลองของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งมากกว่าโคโคพีท ทั้งนี้ Zhou *et al.* [13] ได้กล่าวว่าวัสดุสำหรับนำต้นพืชจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อไปออกปลูกควรสามารถกักเก็บน้ำหรือความชื้นได้อย่างเหมาะสม หากวัสดุปลูกกักเก็บความชื้นได้ไม่ดี จะทำให้ต้นพืชขาดน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ รวมถึงทำให้รากมีการเจริญเติบโตที่ต่ำได้

ตารางที่ 2 ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชระหว่างขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลอง หลังจากนำต้นพืชออกปลูกเป็นเวลา 8 สัปดาห์

การเจริญเติบโตทางด้านต้นและใบ			
วัสดุปลูก	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวนใบใหม่/ต้น	น้ำหนักสดต้นพืช (กรัม)
พีทมอส	2.61±0.38 ^A	2.77±0.69 ^A	0.26±0.11 ^A
โคโคพีท	2.23±0.20 ^B	1.30±1.03 ^B	0.10±0.01 ^B
1 พีทมอส + 1 โคโคพีท	2.42±0.29 ^{AB}	2.13±0.63 ^A	0.19±0.09 ^A
F-test	*	*	*
การเจริญเติบโตทางด้านราก			
วัสดุปลูก	จำนวนรากใหม่/ต้น	ความยาวรากใหม่ (เซนติเมตร)	
พีทมอส	2.67±0.27 ^A	3.04±0.89 ^A	
โคโคพีท	1.10±0.42 ^B	1.55±0.70 ^B	
1 พีทมอส + 1 โคโคพีท	1.73±0.47 ^C	3.85±1.97 ^A	
F-test	*	*	

หมายเหตุ : * คือ พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวดังแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT ผลการทดลองวิเคราะห์ที่ระดับ $p < 0.05$

3.3 กรรมวิธีการดูแลต้นพืชระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง

การศึกษาก่อนหน้าหลายรายงานได้ใช้สารเคมีเพิ่มเติมเพื่อให้ต้นพืชที่นำมาออกรากนอกหลอดทดลองมีการเจริญเติบโตที่เพิ่มสูงขึ้น [13], [21], [22], [25] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของอาหารเหลวสูตร MS, ฟลาโวเจนและไอซิดต่อการนำไปใช้ดูแลต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง ผลการศึกษาพบว่า การดูแลต้นพืชด้วยน้ำกลั่นหรือสารเคมีดังที่กล่าว

มาข้างต้น ส่งผลให้ต้นพืชทุกต้นมีชีวิตรอด ทั้งยังสามารถเจริญให้ใบและรากใหม่ได้ หากแต่การดูแลต้นพืชด้วยน้ำกลั่นมีการเจริญเติบโตของต้นพืชในภาพรวมที่ด้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ผลการทดลองพบว่า การให้อาหารเหลวสังเคราะห์สูตร MS เพิ่มเติมส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นพืช (ความสูงต้น 3.35 เซนติเมตร, จำนวนใบใหม่ 3.37 ใบ/ต้น, น้ำหนักสดต้นพืช 0.92 กรัม) และราก (จำนวนรากใหม่ 5.74 ราก/ต้นพืช, ความยาวรากใหม่ 9.15 เซนติเมตร) สูงกว่าชุดทดลองน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อาหารสังเคราะห์สูตร MS เป็นสูตรอาหารที่มีองค์ประกอบของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรองและสารอินทรีย์ที่หลากหลาย ทั้งยังมีปริมาณเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) ที่สูงจึงสามารถสนับสนุนทุกช่วงการเจริญเติบโตของพืชได้ดี ส่งผลให้อาหารสูตรนี้ถูกนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชอย่างแพร่หลาย [3] ทั้งยังถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเสริมการเจริญเติบโตของพืชระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง [13] หรือใช้ดูแลต้นพืชในขั้นตอนการนำอนุบาลออกปลูกหลังจากที่ชักนำให้เกิดรากในหลอดทดลองแล้ว [25]

ฟลาโวนเจนเป็นสารเคมีทางการเกษตรที่รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ได้ระบุว่าเป็นอาหารเสริมพืชอินทรีย์ที่สกัดสารเคมีจากพืชจำนวน 15 ชนิด ได้เป็นสารฟลาโวนอยด์เข้มข้นขึ้น ฟลาโวนอยด์เป็นสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) ที่ต้นพืชสร้างขึ้นซึ่งมีหน้าที่สำคัญในกลไกการป้องกันตัวของพืช ฟลาโวนอยด์ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเมื่อต้นพืชตกอยู่ในสภาวะเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต (abiotic stress) เช่น ความเค็ม ความแห้งแล้ง ความเข้มแสงที่สูง ทำให้ดำรงไว้ซึ่งสมดุลภายในเซลล์ (homeostasis) ขณะเดียวกันฟลาโวนอยด์มีบทบาทเกี่ยวข้องกับการสร้างไฟโตเล็กซิน (phytoalexin) เมื่อต้นพืชได้รับการรุกรานจากเชื้อจุลินทรีย์หรือศัตรูพืช (biotic stress) [26] ทั้งนี้มีการศึกษาที่พบว่า ฟลาโวนอยด์สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้ (biostimulants) โดยเมื่อต้นพืชได้รับการฉีดหรือพ่นด้วยฟลาโวนอยด์ สารดังกล่าวจะกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการขยายขนาดของเซลล์, การสร้างและพัฒนาของอวัยวะใหม่, การดูดน้ำและแร่ธาตุ และกระบวนการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน ทั้งยังมีบทบาทเพิ่มอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงผ่านการกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งและย่อยสลายของคาร์โบไฮเดรตทำให้มีปริมาณของคลอโรฟิลล์เพิ่มสูงขึ้น และกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเซลล์ปากใบ พร้อมทั้งมีบทบาทร่วม

ในการควบคุมการเปิด/ปิดของปากใบ [27] การศึกษาที่พบว่าต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งที่ได้รับการรดด้วยฟลาโวนเจนมีค่าเฉลี่ยของจำนวนใบใหม่ (3.77 ใบ/ต้น) น้ำหนักสดต้นพืช (0.94 กรัม) และ ความยาวรากใหม่ (9.56 เซนติเมตร) ที่สูงที่สุดจากทั้ง 4 ชุดการทดลอง และให้ค่าเฉลี่ยของความสูงต้น (3.32 เซนติเมตร) และจำนวนรากใหม่ (5.63 ราก/ต้น) เป็นลำดับที่ 2 รองจากชุดการทดลองที่รดต้นพืชด้วย MS อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลการเจริญเติบโตทางต้นและรากระหว่างการรดต้นพืชด้วย MS และ ฟลาโวนเจน พบว่า ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองชุดการทดลองนี้ (ตารางที่ 3) ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งสามารถตอบสนองและนำสารออกฤทธิ์สำคัญของฟลาโวนเจนไปใช้ได้ดี จึงทำให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตในภาพรวมที่ดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาที่พบว่าการผลิตพันธุ์ต้นข้าวด้วยฟลาโวนเจนให้ผลผลิตที่ใกล้เคียงกับวิธีการปลูกที่ใส่ปุ๋ยและพ่นยาควบคุมศัตรูพืชอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นฟลาโวนเจนจึงช่วยลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง และจัดเป็นสารเคมีทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้ดูแลต้นพืช [28] เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายลักษณะ ทั้งนี้ งานวิจัยหลายรายงานได้ระบุว่าสารเคมีที่ใช้ดูแลต้นพืชระหว่างขั้นตอนการออกปลูก [25] หรือการออกรากนอกหลอดทดลอง [13], [21] จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อถูกใช้ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเข้มข้นของฟลาโวนเจนที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ดูแลต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลองต่อไป

โอซิลเป็นสารเคมีทางการเกษตรที่ผลึกของผลิตภัณฑ์ได้ระบุว่าเป็นสารไฮบริด (hybrid solution) ที่มีสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ อนุภาคซิลเวอร์ขนาดนาโนเมตร (silver nanoparticles : AgNPs) เข้มข้น 0.01% (น้ำหนัก/น้ำหนัก) และโพลีกลูโคซามีนโอลิโกเมอร์ (poly-glucosamine oligomer) เข้มข้น 15% (น้ำหนัก

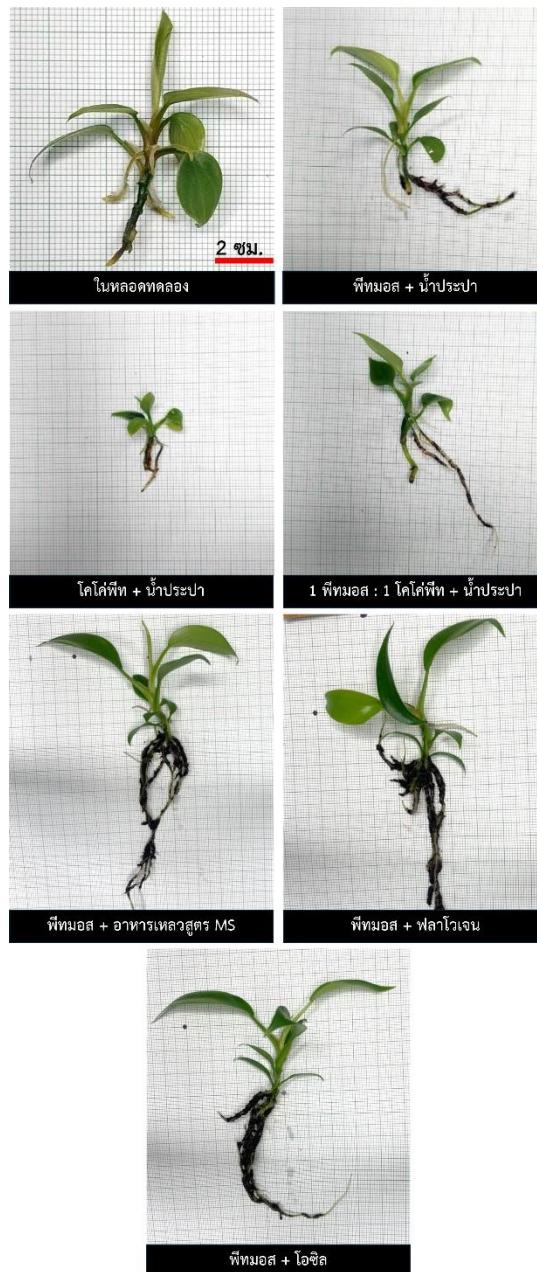
/น้ำหนัก) AgNPs สามารถถูกดูดซึมและเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเซลล์พืชผ่านระบบท่อลำเลียงซึ่งต้นพืชจะนำ AgNPs ไปใช้สนับสนุนการเจริญเติบโตหรือส่งเสริมกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ต่อไปได้ เช่นเพิ่มอัตราการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์เพื่อนำไปใช้ย่อยสลายธาตุหรืออาหารสำคัญ, กระตุ้นการสังเคราะห์รงควัตถุเพื่อให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงขึ้น, ยับยั้งการสร้างเอทิลีนซึ่งเป็นฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับการแก่และการตายของเซลล์ และกระตุ้นการสร้างรากเพื่อให้ต้นพืชสามารถดูดซับธาตุอาหารและน้ำได้สูงขึ้น [29] โพลีกลูโคซามีนเป็นสารในกลุ่มไคโตซาน (chitosan) ซึ่งไคโตซานจะพบในกลุ่มสัตว์ขาปล้อง (arthopods) และในโครงสร้างผนังเซลล์ของเชื้อรา สารชนิดนี้ช่วยให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตที่เพิ่มมากขึ้นได้ โดยกระตุ้นให้ต้นพืชสร้างสารทุติยภูมิและสารควบคุมการเจริญเติบโต

ให้สูงขึ้นผ่านกลไกการป้องกันตัวหรือการตอบสนองต่อสภาวะเครียด อีกทั้งมีการศึกษาที่พบว่าไคโตซานสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงและกลไกการเมแทบอลิซึมเบื้องต้นของคาร์บอนและไนโตรเจนในต้นพืช [30] อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบว่าไอซิลให้การเจริญเติบโตทางต้น (ความสูงต้น 2.80 เซนติเมตร, จำนวนใบใหม่ 3.20 ใบ/ต้น, น้ำหนักสดต้นพืช 0.86 กรัม) และราก (จำนวนรากใหม่ 5.13 ราก/ต้น, ความยาวรากใหม่ 7.51 เซนติเมตร) ที่ดีกว่าการใช้อาหารเหลวสูตร MS และพลาโวเจน (ตารางที่ 3, รูปที่ 1) ซึ่งต้นพืชเดนดรอนก้ามกุ้งอาจนำสารออกฤทธิ์สำคัญในไอซิลไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้ไม่ทัน จึงทำให้สารเคมีชนิดนี้อาจไม่เหมาะสมต่อการนำมาดูแลพืชชนิดนี้ระหว่างการออกรากนอกหลอดทดลอง

ตารางที่ 3 ผลของกรรมวิธีต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชระหว่างขั้นตอนการออกรากนอกหลอดทดลอง หลังจากนำต้นพืชออกปลูกเป็นเวลา 8 สัปดาห์

การเจริญเติบโตทางด้านต้นและใบ			
สารเคมี	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวนใบใหม่/ต้น	น้ำหนักสดต้นพืช (กรัม)
น้ำกลั่น	2.59±0.37 ^B	3.17±0.36 ^B	0.25±0.11 ^B
อาหารเหลว สูตร MS	3.35±0.43 ^A	3.37±0.40 ^B	0.92±0.15 ^A
พลาโวเจน	3.32±0.12 ^A	3.77±0.32 ^A	0.94±0.07 ^A
ไอซิล	2.80±0.28 ^B	3.20±0.28 ^B	0.86±0.16 ^A
F-test	*	*	*
การเจริญเติบโตทางด้านราก			
สารเคมี	จำนวนรากใหม่/ต้น	ความยาวรากใหม่ (เซนติเมตร)	
น้ำกลั่น	2.70±0.25 ^C	2.70±1.19 ^C	
อาหารเหลวสูตร MS	5.74±0.61 ^A	9.15±1.60 ^A	
พลาโวเจน	5.63±0.78 ^{AB}	9.56±1.03 ^A	
ไอซิล	5.13±0.57 ^B	7.51±1.13 ^B	
F-test	*	*	

หมายเหตุ : * คือ พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวดังแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMRT ผลการทดลองวิเคราะห์ที่ระดับ $p < 0.05$



รูปที่ 1 การเจริญเติบโตของต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้ง

4. สรุป

งานวิจัยนี้พบว่าต้นฟีโลเดนดรอนก้ามกุ้งที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสามารถชักนำให้เกิดรากนอกหลอดทดลองได้ทุกต้นโดยที่ไม่พบการตายของต้นพืช ทั้งนี้การออกรากนอกหลอดทดลองจำเป็นต้องใช้วัสดุปลูกและสารเคมีสำหรับดูแลต้นพืชให้เหมาะสม

เพื่อให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตและพัฒนาทั้งทางยอดและรากที่ดี ซึ่งพบว่าการใช้ฟิโทมอสเป็นวัสดุปลูกและการรดต้นพืชด้วยสารละลายฟลาโวนเจนส่งผลให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตในภาพรวมสูงที่สุด การศึกษานี้นอกจากจะช่วยป้องกันปัญหาการตายของต้นพืชเมื่อนำออกปลูกนอกระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อแล้ว ยังสามารถนำไป

ประยุกต์ใช้เพื่อลดต้นทุนและระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อขยายพันธุ์พืชเศรษฐกิจชนิดนี้ เนื่องจากทำให้ขั้นตอนการเกิดรากและการอนุบาลออกปลูกเกิดขึ้นไปพร้อมกันในช่วงขั้นตอนเดียว ส่งผลให้การผลิตต้นพืชโตเต็มทรงตามกำหนดเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีศักยภาพสูงขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Kittithanawat, Situation and Direction of Ornamental Plants in Thailand in 2020. Bangkok: Horticulture Research Institute. Department of Agriculture, 2020.
- [2] Digital Agricultural Database System, "Philodendron pedatum," [Online]. Available: <https://data.addrun.org/plant/archives/935-philodendron-pedatum>. [Accessed: Jun. 13, 2024].
- [3] E.F. George, M.A. Hall, and G.J. De-Klerk, *Plant Propagation by Tissue Culture*, 3rd ed. Dordrecht : Springer, 2008.
- [4] K. Kumar and I.U. Rao, "Morphophysiological problems in acclimatization of micro propagated plants in - ex vitro conditions - a reviews," *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*, vol. 2, no. 4, pp. 271-283, 2012.
- [5] A. Mathur, A.K. Mathur, P. Verma, S. Yadav, M.L. Gupta, and M.P. Darokar, "Biological hardening and genetic fidelity testing of micro-cloned progeny of *Chlorophytum borivilianum* Sant. et Fernand," *African Journal of Biotechnology*, vol. 7, no. 8, pp. 1046-1053, 2008.
- [6] I. Kataoka, "Influence of rooting substrates on the morphology of papaya root formed in vitro," *Japanese Journal of Tropical Agriculture*, vol. 38, no. 3, pp. 251-257, 1994.
- [7] H. Yan, C. Liang, L. Yang, and Y. Li, "In vitro and ex vitro rooting of *Siratia grosvenorii*, a traditional medicinal plant," *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 32, pp. 115-120, 2010.
- [8] P.C. Debergh and L.J. Maene, "A scheme for commercial propagation of ornamental plants by tissue culture," *Scientia Horticulturae*, vol. 14, no. 4, pp. 335-345, 1981.
- [9] M.T. McClelland, M.A. Smith, and Z.B. Carothers, "The effects of in vitro and ex vitro root initiation on subsequent micro cutting root quality in three woody plants," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 23, pp. 115-123, 1990.
- [10] B. Borkowska, "Morphological and physiological characteristics of micropropagated strawberry plants rooted in vitro or ex vitro," *Scientia Horticulturae*, vol. 89, no. 3, pp. 195-206, 2001.
- [11] K.K. Ranaweera, M.T. Gunasekara, and J.P. Eeswara, "Ex vitro rooting: a low cost micropropagation technique for Tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntz) hybrids," *Scientia Horticulturae*, vol. 155, pp. 8-14, 2013.
- [12] S.J. Dalanhol, A.C. Nogueira, S. Gaiad, and D. Kratz, "Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and fertilization on growth of

- seedlings of *Eugenia uniflora* L., produced in different substrates,” *Revista Brasileira De Fruticultura*, vol. 38, no. 1, pp. 117-128, 2016.
- [13] J. Zhou, F. Guo, C. Qi, J. Fu, Y. Xiao, and J. Wu, “Efficient *ex-vitro* rooting and acclimatization for tissue culture plantlets of ginger,” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 150, no. 2, pp. 451-458, 2022.
- [14] A.A. Alawaadh, Y.H. Dewir, M.S. Alwihibi, A.A. Aldubai, S. El-Hendawy, and Y. Naidoo, “Micropropagation of lacy tree philodendron (*Philodendron bipinnatifidum* Schott ex Endl.),” *HortScience*, vol. 55, no. 3, pp. 294-299, 2020.
- [15] F.C. Chen, C.Y. Wang and J.Y. Fang, “Micropropagation of self-heading Philodendron via direct shoot regeneration,” *Scientia Horticulturae*, vol. 141, pp. 23-29, 2012.
- [16] T.T. Ninh, H.T. Nguyen, T.S. Dinh, T.D. Pham, and T.H. Nong, “In vitro propagation of *Philodendron hederaceum* “Lemon Lime”,” *Bản B của Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, vol. 65, no. 12, pp. 64-69, 2023.
- [17] S.Y. Lee, E.G. Kim, J.R. Park, Y.H. Ryu, W. Moon, G.H. Park, M. Ubaidillah, S.N. Ryu, and K.M. Kim, “Effect on chemical and physical properties of soil each peat moss, elemental sulfur, and sulfur-oxidizing bacteria,” *Plants*, vol. 10, no. 9, 1901, 2021.
- [18] S. Taskila, R. Särkelä, and J. Tanskanen, “Valuable applications for peat moss,” *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 6, pp.115-126.
- [19] A. Ghareeb, M. Khalil, and A.E. Helal, “*Philodendron domesticum* G.S. Bunting plant responses to potting media,” *Journal of Productivity and Development*, vol. 26, no. 3, pp. 491-512, 2021.
- [20] M. Akramian, A. Khaleghi, and H. Salehi-Arjmand, “Optimization of plant growth regulators for in vitro mass propagation of *Philodendron* cv. Birkin through shoot tip culture,” *Greenhouse Plant Production Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 55-62, 2024.
- [21] M. Manokari, S. Priyadharshini, P. Jogam, A. Dey, and M.S. Shekhawat, “Meta-topolin and liquid medium mediated enhanced micropropagation via ex vitro rooting in *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews,” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 146, pp. 69-82, 2021.
- [22] B. Benmahioul, N. Dorion, M. Kaid-Harche, and F. Daguin, “Micropropagation and ex vitro rooting of pistachio (*Pistacia vera* L.),” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 108, pp. 353-358, 2012.
- [23] T. Murashige and F. Skoog, “A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures,” *Physiologia Plantarum*, vol. 15, no. 3, pp. 473-497, 1962.
- [24] W.F. Ilahi and D. Ahmad, “A study on the physical and hydraulic characteristics of cocopeat perlite mixture as a growing media in containerized plant production.”

- Sains Malaysiana*, vol. 46, no. 6, pp.975-980, 2017.
- [25] H.M. Hassan, M.A. Ali, and D.A. Soliman, "Effect of low cost gelling agents and some growth regulators on micropropagation of *Philodendron selloum*," *Journal of Plant Production*, vol. 7, no. 2, pp. 169-176, 2016.
- [26] A. Shah and D.L. Smith, "Flavonoids in agriculture: chemistry and roles in, biotic and abiotic stress responses, and microbial associations," *Agronomy*, vol. 10, no.8, 1209, 2020.
- [27] A. Martinez-Alonso, L. Yepes-Molina, A.L. Guarnizo, and M. Carvajal, "Modification of gene expression of tomato plants through foliar flavonoid application in relation to enhanced growth," *Genes*, vol. 14, no. 12, 2208, 2023.
- [28] *Annual Report 2010-2011*, RNR-RC, Bajo Wang-due Phodrang, Renewable Natural Resources Research & Development Centre-Bajothang, 2011.
- [29] S. Mahajan, J. Kadam, P. Dhawal, S. Barve, and S. Kakodkar, "Application of silver nanoparticles in *in-vitro* plant growth and metabolite production: revisiting its scope and feasibility," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 150, no. 1, pp. 15-39, 2022.
- [30] N. Coelho and A. Romano, "Impact of chitosan on plant tissue culture: recent applications," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 148, pp. 1-13, 2022.

The Optimization of Cassava Transportation to Reduce Carbon Emission

Thitinun Pongnam¹ Paramust Juntarakod^{2*} Banlu Phaichin¹ and Khanitta Chaibundit³

¹Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

³Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

^{1,2}150 Srichan Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang Khon Kaen District, Khon Kaen, 40000

³744 Suranarai Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 7 January 2026; Revised 2 April 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

This research utilized Genetic Algorithm (GA) to optimize cassava transportation routes from cultivation fields to nearby collection yards, with the objective of minimizing CO₂ emissions based on optimized distances. Data collected included plot coordinates, plot size, vehicle type, vehicle weight, and payload capacity for each vehicle type to collection yard A, as well as coordinates of two alternative nearby collection yards, B and C. Four vehicle types, including tractor, farm tractor, 6-wheel truck, and pickup truck, were analyzed in transporting cassava from 20 surrounding plots to collection yard A, with each delivering different volumes of cassava. The GA-based optimization of routing grouped the 20 plots into efficient collection routes servicing three different yards (A, B, and C), achieving a total of 18 optimized trips, which the results section that the workload was equally distributed, with each yard (A, B, and C) receiving 6 trips to ensure operational consistency across all route and payload identified a required vehicle capacity of 17,000 kg to satisfy the minimum theoretical trip demand. When CO₂ emissions were calculated along the optimized route, the observed emissions from actual operations were substantially higher than the GA-derived values. Total CO₂ emissions GA were decreased carbon emissions by up to 67.2 – 68.1 % compared to using Tractors and Farm tractors, 54.6 % when using 4-wheel pickup trucks and 0.09 % for the 6-wheel trucks. The results demonstrate that GA driven optimization significantly enhances agricultural logistics by reducing transportation time, costs, and environmental impact through the strategic selection of collection yards and vehicle types

Keywords : Genetic algorithm; Greenhouse gas; Cassava; Carbon emission; Optimization

* Corresponding Author. Tel.: +668 6354 8683, E-mail Address: paramust.ju@rmuti.ac.th

1. Introduction

Cassava is a vital crop in many tropical countries, serving as a critical source of carbohydrates for both human and animal consumption [1]- [2]. It also holds substantial industrial value as a raw material for renewable energy production, particularly ethanol. Its utilization, however, varies sharply by region: Africa primarily uses cassava for direct consumption, while the Americas focus on commercial cultivation for industrial supply. In Asia, cassava is predominantly utilized by the downstream industry rather than for direct consumption. Globally, production is concentrated in Africa, followed by Asia, the Americas, and Oceania. As of 2022, Thailand ranked as the third-largest cassava producer in the world, after Nigeria and Congo [3]. Thailand is a major exporter of cassava products, supplying markets such as China, Japan, Indonesia, Taiwan, and Malaysia, with cassava product exports valued at approximately 3,133.4 million USD [4]. Cassava cultivation is widespread across all regions of Thailand, with the Northeast accounting for the largest share at 54.5%, followed by the Central (25.6%) and Northern (19.9%) regions, totaling to approximately 7.9 million Rai (1.26 million hectares). The Northeast alone yields about 15.39 million tons per year [5]. For the 2025-2026 period, cassava output is projected to increase, driven by an expansion of harvested area in response to rising demand from the energy and animal feed industries, as well as the need for product stock to ensure food and energy security [6]. This growth is expected to

intensify activity across the entire cassava supply chain, from cultivation to processing. An analysis of the cassava starch supply chain identified three major contributors to the product's carbon footprint (CF): cultivation, root transport, and starch processing. Cultivation is the dominant factor, accounting for 52% of the total CF, while cassava root transport contributes 8% [7]. Globally, the largest source of greenhouse gas (GHG) emissions from human activities stems from burning fossil fuels for electricity, heat, and transportation. In the United States in 2022, total GHG emissions by economic sector were distributed as follows: transportation (28%), electric power (25%), industry (23%), commercial and residential (13%), and agriculture (10%) [8].

In the transport sector, there is a global drive toward promoting the use of renewable energy, particularly electric power, to reduce GHG emissions. The global goal is to achieve Net Zero Emissions by 2050, while Thailand has set its target for 2065. Within this framework, the Thai transport sector aims to reduce its GHG emissions by 20% by 2030 [9]- [10]. This objective remains challenging, despite supportive policies such as import tax reductions for electric vehicles and investments in public transport system. Within the agricultural supply chain, farmers typically use small trucks (like "E-taen" vehicles) and six-wheel trucks to transport produce from their farms to factories or purchasing points. Motorcycles are also used for small-volume transportation to middlemen or collection yards. Most farmers sell their

produce to nearby buyers or processors, with only a minority engaging in long-distance or inter-provincial markets [11].

The reliance on internal combustion engine (ICE) vehicles for transporting agricultural goods exacerbates traffic congestion, overweight loading, particulate matter (PM) dust pollution, and GHG emissions in line with rising industrial demand [12]- [13]. Existing studies on cassava transport logistics primarily focus on movement from middlemen to industrial factories, which typically involves only a few trips by large trucks. This is because large-scale operators actively manage transport operations to minimize costs and product damage. However, the initial transport stage, from the farmer's field to the collection yard (**Fig. 1**) or middleman, has received far less attention. Farmers typically bring fresh cassava roots directly to the yards or factories, often choosing the destination based on listed prices, familiarity, or proximity to their farms. Transport planning at this stage is largely informal and habit-driven, with limited consideration of costs, trip frequency, or travel distance.



Fig. 1 Cassava collection yard.

A lack transport consolidation among farmers increases the number of trips, exacerbating traffic issues, overloading problems (**Fig. 2**), and environmental pollution. Optimizing transport routes from cultivation fields to suitable collection yards or buyers, considering factors such as distance, price, and emission reduction (especially greenhouse gases), would help alleviate transportation challenges. Such optimization would support both farmers and the government in achieving the Net Zero Emission targets for the transport sector.



Fig. 2 Cassava transport with overloaded vehicle.

The genetic algorithm (GA) is widely recognized as a powerful optimization tool for solving transportation problems, capable of producing superior solutions within reasonable computational times [14]- [15]. Recent research has demonstrated that GA can provide upper bounds on objective function values, yielding a computationally efficient and statistically robust solution for vehicle routing problems involving perishable products [16]. Furthermore, GA can be applied to solve vehicle routing problems to reduce carbon emissions and promote sustainable development in the transportation sector. For instance, GA has been applied to analyze the impact of environmental self-regulation on the

Vehicle Routing Problem (VRP), considering carbon emissions from fuel combustion, which are determined by distance, fuel carbon content, fuel consumption, and driver category. These studies demonstrate that GA is a promising approach for addressing these challenges [17].

Therefore, this study proposes using GA to determine optimal transport routes for cassava from cultivation fields to nearby collection yards. The GA optimized model is compared against actual transportation data from an observation yard, where current practices involve various informal methods, typically using one truck per plot based on conventional practice, which the inefficient transportation methods lead to increased air pollution. The analysis focuses on minimizing carbon dioxide emissions by optimizing both transport routes and vehicle load capacity. This framework provides a systematic approach for identifying optimal transport paths, aiding in carbon emission reduction, and offering guidance for future policy formulation on the transport of other economic crops, balancing agricultural income with carbon emissions.

2. Research Methodology

2.1 Data Collection

1. Data were collected on the types and number of vehicles used to transport cassava to local purchasing yards in Khon Kaen Province, Thailand. The survey identified four categories of vehicles utilized for this transport: tractor, farm tractor (e-taen thai tractors), 6-wheel truck, and pickup truck (**Fig. 3 a – d**). This

research considered only diesel-fueled vehicles, as diesel engines offer higher efficiency and simpler engine design, making them the preferred choice for heavy transport compared to gasoline-powered alternatives [18].

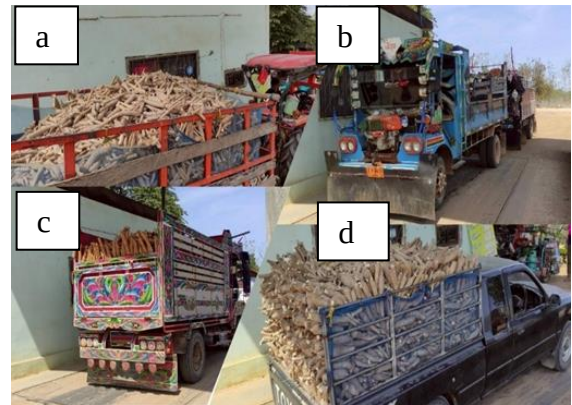


Fig. 3 Vehicle types used for cassava transport: (a) Tractor, (b) Farm tractor, (c) 6-wheel truck, and (d) Pickup truck.

2. Initial data were collected at Purchasing Yard A to determine the vehicle types used by farmers, the average payload (loading weight), the average vehicle weight (tare weight) (**Table 1**) (**Fig. 4**). Subsequently, two nearby purchasing yards, Yard B and Yard C, were selected based on their coordinates obtained from Google Earth Pro.

Table 1 Average payload and tare weight of vehicles used for cassava transport.

Truck	Payload avg (kg)	Tare weight avg (kg)
Pickup	2453	1663
6-wheel	4052	3266
Tractor	3354	2620
Farm tractor	3800	2165



Fig. 4 Weight measurement of cassava transport trucks.

3. The payload weight factor was determined according to the standard used for calculating CO₂ emissions, following the Thai National LCI Database, TIIS-MTEC-NSTDA (with TGO electricity data for 2016-2018). For truck transportations, loading conditions were categorized into two groups: 100% and 0% [19].

4. The commuting distance between the farms and yards was calculated using the coordinates (longitude and latitude) of farm and yard locations obtained from Google Earth Pro and QGIS (**Fig. 5**).

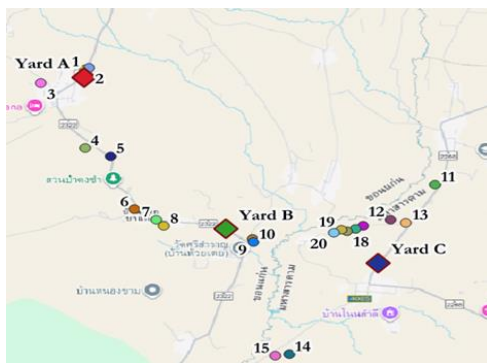


Fig. 5 Locations of 20 cassava plots and three purchasing yards (A, B, and C).

2.2. Optimization of the routes using GA

2.2.1 Optimization of the routes.

GA searches for optimal solutions by mimicking natural selection and evolutionary processes [20]- [21]. It iteratively generates, tests, and refines a population of candidate solutions (routes) until a highly optimized result is obtained. In the cassava transportation problem, GA importance lies in its ability to simultaneously determine key parameters, including:

1. Problem Formulation

The logistics problem involves collecting cassava from $n = 20$ distinct customer nodes (cassava plots). These nodes were geographically defined by their GPS coordinates (longitude and latitude). The objective is to minimize the total distance traveled by the vehicle fleet, which is used as an established proxy for reducing operational costs and associated emissions.

2. Key Parameters and Constraints

2.1. Customer demand: Each of the 20 cassava plots had a different demand, resulting in a total aggregate demand of 286,200 kg. This total demand was calculated based on the plantation area, as shown in **Fig. 6**., where the estimated yield was 2,700 kilograms [22] of cassava per 1,600 m² harvested.

2.2. Vehicle fleet and cassava plots:

The operation employed a fleet of $m = 3$ vehicles, which must originate and terminate their routes at one of the $k = 3$ distinct cassava plot locations.

2.3. Capacity constraint: The primary constraint is the maximum vehicle loading capacity. The model considered a range of truck capacity values (5,000 kg to 32,000 kg). The maximum value of 32,000 kg aligns with the TGO standard for large transport vehicles [19]), with particular focus on operationally relevant values between 7,000 kg and 32,000 kg. These capacity levels align with transportation guidelines [19] and the empirical data summarized in Table 1, where the lowest observed weight was about 5,000 kg. For all routes, the total load on any vehicle must not exceed the specified capacity limit.

2.2.2. Trip Requirement Analysis

In the post-processing stage, the logistical efficiency of the optimized solution was quantified:

1. Theoretical minimum trips: This value represented the lower bound on the number of trips, calculated by dividing the total demand by the single vehicle capacity.

2. Total optimized trips: The actual number of required trips was determined by analyzing the route structure, specifically by counting the segments where the route returned to a depot for unloading, indicated by a sequence breaks. This value was equal to or slightly higher than the theoretical minimum, reflecting the added inefficiencies imposed by geographic clustering of cassava plots. Given the fundamental constraint that total optimized trips must be greater than or equal to the theoretical minimum, to the study examined the impact of varying vehicle capacity. To ensure robust and applicable results, the

system was analyzed across a range of plausible truck capacity values, from 5,000 to 32,000 kg. This experimental approach ensured that the calculated total optimized trips respected capacity constraints and remained greater than or equal to the corresponding theoretical minimum.

3. Fleet allocation: The final step estimated the trip workload distribution across the three available trucks (Truck 1-3), assuming GA achieved a balanced assignment to maximize fleet utilization.

2.3. Analysis of CO₂ emissions from cassava transport compared with GA optimized routes.

Following optimization of cassava transport routes using GA, the resulting optimal distance was used to calculate the CO₂ emissions according to equation (1) [23]. Calculations were performed for all four vehicle types over the investigated capacity range (5,000 to 32,000 kg), assuming a 100% payload for each trip.

$$\text{Emissions} = \text{Activity} \times \text{Emission factor} \quad (1)$$

When

$$\text{Activity} = \text{Distance (km)}$$

$$\text{Emission factor (EF)} = \text{GHG emissions per unit (kgCO}_2\text{eq/kg)}.$$

3. Results and Discussion

3.1. Optimization of cassava transportation routes using GA

The optimization of cassava transportation routes using GA was conducted for vehicle capacities ranging

from 5,000 to 32,000 kg. The estimated cassava yield for plots 1–20 (**Fig. 5**) was 2,700 kg per 1,600 m². The resulting optimized routes and associated metrics are presented in **Fig. 7** and **Fig. 8**.

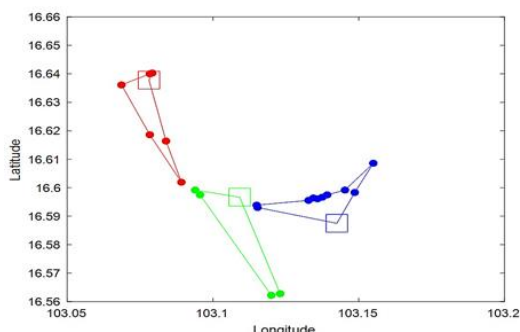


Fig. 7 Optimized cassava transportation routes generated by the Genetic Algorithm (GA)

Fig. 7. The Optimized routes of GA across a range of vehicle payloads, specifically from 5,000 kg to 32,000 kg. The results showed that, the minimum value required to achieve a total of 18 trips (**Fig. 8**) was a vehicle capacity of 17,000 kg, according to the TGO standard for 10-wheel transport vehicles [19] and above were required for the cassava transport routes to satisfy the minimum theoretical trip requirement.

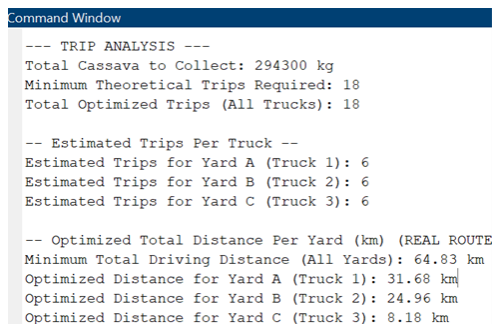


Fig. 8 The trip analysis and optimized travel distance for GA-based cassava transport.

Fig. 8. The GA was applied to optimize routes and payloads which the overall trip analysis, confirming high logistical efficiency. The total amount of cassava collected was 294,300 kg, and the minimum theoretical number of trips was 18. The GA-optimized solution achieved this lower bound, yielding a total of 18 optimized trips across all trucks. This result fully satisfies the condition that the realized number of trips must be greater than or equal to the corresponding theoretical minimum.

Furthermore, the estimated trips per truck, as determined by GA, indicate a near equal distribution of workload among the three collection yards: Yard A, Yard B, and Yard C each required 6 trips to complete the transportation task.

3.2 Carbon dioxide emissions per kilometer based on GA-determined truck weight

Used the optimized cassava transportation routes determined by the GA, the optimization is performed, which follows an iterative evolutionary process (1) initial population of potential routing sequences, (2) fitness evaluation based on route, load and round, (3) selection of the most efficient routes, (4) crossover to combine optimal route segments, and (5) mutation to prevent local optima. This process continues until the algorithm identifies the optimal. This process continues until the algorithm identifies the global optimum for the logistics network, which the CO₂ emissions were calculated along these routes. The analysis considered vehicle mass constraints, with the minimum

cassava payload set at 17,000 kg as determined by the GA optimization, in accordance with the standard specifications for 10-wheel trucks outlined by the Thailand Greenhouse Gas Management Organization [19]. The truck’s empty (tare) weight was approximately 13,500 kg [24], resulting in a gross vehicle weight (GVW) of 30,500 kg at full load. This approach ensures that the environmental impact assessment reflects both optimized routing and realistic vehicle operating conditions.

Table 2 Optimized cassava transportation routes determined by GA.

Yard	Plot				Trips	Dist. (km)	Google Dist. (km)	Error (%)
A	2	1	3	4	6	33.63	28.56	18
	6	5						
B	7	8	15	14	6	24.96	49.15	49
C	10	9	20		6	8.18	46.28	82
	19	18	17					
	16	12	11					
	13							
Total						66.77	124.00	46

As presented in **Table 2**, a subsequent validation of the optimized routes against real-world driving distances using Google Earth Pro revealed a significant discrepancy: the total distance estimated by GA deviated by 46% from the actual georeferenced routes. This considerable variance is attributed to the GA reliance on the straight-line distances based on GPS coordinates for its fitness function, which does not account for road networks and topographic barriers.

Consequently, to ensure the validity and accuracy of the environmental impact assessment, CO₂

emissions were calculated using the validated real driving distances obtained from the Google Earth Pro analysis rather than the initial GA estimated values. However, the calculations continued to follow the transportation routes determined by GA.

3.3 A Comparative CO₂ Emission Analysis: Scenario Using Observational Data

The results presented in **Table 3** detail a comparative analysis of CO₂ emissions based on observational data collected specifically from Yard A. The simulation incorporated four distinct truck types (as specified in **Tables 1** and **2**) and employed distances derived from Google Earth Pro for the yard-to-plot routes. While the GA-generated transportation routes were based on grouping to optimize collection, the actual operations involved a single vehicle servicing each plot, carrying as much as possible per trip and making multiple trips until all cassava was harvested. The number of transport trips was fixed at the theoretical minimum required to service the total demand. Emission calculations accounted for load factors on the two-way journey: the 0 % load emission factor was applied to the outbound leg (from the receiving yard to the cassava plot), and the 100 % load emission factor was applied to the inbound leg (from the cassava plot back to the yard) All trips were assumed to start and end at a designated yard. The total CO₂ emissions (kgCO₂eq) are summarized in **Table 3**.

Table 3 Total CO₂ emissions (kgCO₂eq) calculated from observational data compared with emissions estimated using GA determined routes.

	Yard	Pickup	6-wheel	Tractor	Farm tractor	GA
	A	69.32	27.85	91.17	83.43	30.84
	B	106	48.40	144.94	160.22	44.02
	C	100.36	49.09	145.53	148.94	50.40
	Total	275.67	125.37	381.65	392.59	125.26
SD	A	12.97	5.67	15.57	17.56	2.31
	B	20.79	9.35	29.03	30.89	4.32
	C	5.14	2.48	7.26	7.24	2.16
Max	A	30.20	12.25	36.06	39.13	7.93
	B	56.29	25.70	78.64	83.81	12.20
	C	19.72	9.64	28.10	27.72	6.73
Min	A	0.61	0.18	1.02	0.42	0.11
	B	1.18	0.81	2.00	2.37	0.36
	C	1.63	1.12	2.77	3.27	0.11

The comparative analysis **Table 3** demonstrates a significant disparity, with observed CO₂ emissions exceeding those estimated by GA optimization. A small standard deviation indicates high consistency and minimal variability in the observational data, which represent the environmental impact boundaries for each scenario. In contrast, the GA Optimization significantly narrows CO₂ emissions gap between maximum and minimum values by balancing workloads and optimizing routes.

Moreover, the GA model at Yard A exhibited an R² value of 0.51, suggesting that the independent variables explain approximately 51% of the variability observed in the dependent variable, as shown in **Fig. 9**.

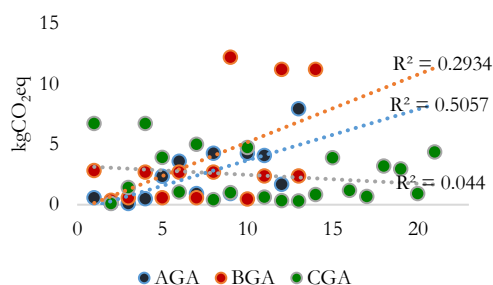


Fig. 9 CO₂ emissions from cassava transportation to yards A, B, and C as optimized by GA.

Fig. 9. The lower R² values for BGA and CGA compared to AGA are attributed to the higher variability in plot sizes and distribution within the yard group. While GA optimizes for a target payload of 17,000 kg, the actual harvest totals from the farms often result in residual loads, which results in more trip frequencies that do not scale linearly with distance. Consequently, the payload weight becomes an important factor in emission variance, leading to the observed data dispersion in the regression analysis.

This substantial divergence can be primarily attributed to two key operational factors: the lower effective capacity of the vehicles used in the observational data and the resulting increased number of necessary transport trips. The suboptimal utilization of vehicle capacity in real-world practice necessitates more trips to satisfy the total demand, directly leading to greater fuel consumption and CO₂ emissions.

4. Conclusion

The optimization of cassava transportation using GA proved highly effective for agricultural logistics management, enabling the rapid generation of optimal transport plans to both farmers and receiving centers. This study demonstrated that implementing a tailored logistics strategy significantly reduces time, cost, and environmental pollution compared to conventional methods, primarily through the optimized selection of receiving yards and vehicle types. Although the GA successfully addressed both capacity and routing, a notable limit was a 46% error in the estimated total distance compared to actual travel distances. After adjusting to real driving distances by Google earth pro, the GA optimized transport strategy utilizing 10 - wheel trucks with a payload of at least 17,000 kg and a grouped collection approach can decreased carbon emissions by up to 67.2-68.1% compared to using Tractors and Farm tractors, 54.6 % when using 4 - wheel pickup trucks and 0.09 % for the 6 - wheel trucks, although 10-wheel trucks have difficulty to access farmland, the result was a policy alternative through farmer groups to enable the use of larger, more efficient vehicles. Furthermore, although payload and carbon emissions are directly proportional, the GA optimization demonstrates that the significant reduction in the total number of trips outweighs the increased per-trip emissions. By consolidating the total Cassava 294,300 kg into the theoretical minimum of 18 trips using a 17,000 kg capacity which

was decreased overall carbon emissions compared to multiple trips by smaller, less efficient vehicles. In particular, it supports strategies such as minimizing partially loaded trucks and empty vehicle runs, selecting appropriate vehicle sizes, and establishing farmer cooperatives (or groups) to achieve cost savings [11]. Route optimization remains a fundamental efficiency strategy, as it directly reduces operating costs and is already widely recognized and exploited in practice [18].

5. Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the Faculty of Industrial Education and the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, for providing the facilities and support that enabled this research.

6. References

- [1] J. H. Cock, "Cassava: A Basic Energy Source in the Tropics," *Science*, vol. 218, no. 4574, pp. 755–762, 1982.
- [2] J. A. Montagnac, C. R. Davis, and S. A. Tanumihardjo, "Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement," *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol.8, no. 3, pp. 181-194, 2009.
- [3] Rayong Field Crops Research Center, "Cassava," in *Academic Seminar on New Field Crop Varieties*, River Kwai village hotel, Kanchanaburi, Thailand, 2014, pp. 6-14.

- [4] Thai PBS, “Tapioca Exports Rebound After 14 Months; Commerce Ministry Confirms Market Support,” [Online]. <https://www.thaipbs.or.th>. [Accessed: Nov. 30, 2025].
- [5] Center for Agricultural Information, “Cassava,” [Online]. <https://oae.go.th/home/article/475>. [Accessed: Nov. 30, 2025].
- [6] Cassavahub, “Cassava: A Vital Economic Crop for Thailand and its Future Trajectory,” 2025. [Online]. <https://cassavahub.org/>. [Accessed: Nov. 28, 2025].
- [7] S. Trakulvichean, N. Chokmongkol, R. Lerdlattaporn, K. Saengchan, K. Lueangwattanapong, and W. Songkasiri, “Carbon footprint of cassava starch in Thailand: A comprehensive study of production scale and production chain,” *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 18, 2025.
- [8] U.S. Environmental Protection Agency, “Sources of Greenhouse Gas Emissions,” [Online]. <https://www.epa.gov/ghgemissions>. [Accessed: Dec. 2, 2025].
- [9] *Office of Transport and Traffic Policy and Planning*, Plan on Greenhouse Gas Emission Reduction 2021–2030 for the Transport Sector, Ministry of Transport, p.3, 2023.
- [10] W. Wangjiraniran and B. E. arporn “A Study on Energy-Related GHG Mitigation Scenario in Thailand,” *Engineering Journal.*, vol. 16, no. 2, pp. 19-30, 2012.
- [11] *Research report*, Supply chain and logistics management for cassava products in Thailand, Office of the Higher Education Commission, 2009.
- [12] S. J. H. Bandara and N. Thilakarathne, “Economic and Public Health Impacts of Transportation-Driven Air Pollution in South Asia,” *Sustainability*, vol. 17, no. 5, p. 2306, 2025.
- [13] K. Grondys, “The impact of freight transport operations on the level of pollution in cities.” *Transportation Research Procedia*, vol. 39, pp. 84-91, 2019.
- [14] S. Saeed, “Implementation of Genetic Algorithms for Optimization of Transportation Problem,” *Sir Syed University Research Journal of Engineering & Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 15-19, 2018.
- [15] R. Lertsakwanit and A. Vilasdaechanont, “Ocular Prosthesis Fabrication Scheduling Using Genetic Algorithm,” *Engineering Journal*, vol. 28, no. 11, pp. 69-79, 2024.
- [16] A. K. Agrawal, S. Yadav, A. A. Gupta, and S. Pandey, “A genetic algorithm model for optimizing vehicle routing problems with perishable products under time-window and quality requirements,” *Decision Analytics Journal*, vol. 5, p. 100139, 2022.
- [17] X. Zhang, Y. Hao, L. Zhang, and X. Yuan, “Application of improved genetic algorithm to vehicle routing problem considering the environmental self-regulation of the

- freight companies,” *Expert Systems with Applications*, vol. 274, 2025.
- [18] R. Ulrich, G. Thoma, D. Nutter, and J. Wilson, “Tailpipe greenhouse gas emissions from tank trucks transporting raw milk from farms to processing plants,” *International Dairy Journal*, vol. 31, pp. S50-S56, 2013.
- [19] TGO, “Emission Factor,”[Online]. <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php>. [Accessed: Sep. 5, 2025].
- [20] M. A. Albadr, S. Tiun, M. Ayob, and F. AL. Dhief, “Genetic Algorithm Based on Natural Selection Theory for Optimization Problems,” *Symmetry*, vol. 12, no. 11, 2020.
- [21] P. S. Othman, R. R. Ihsan, and R. M. Abdulhakeem, “The genetic algorithm (GA) in relation to natural evolution,” *Academic Journal of Nawroz University*, vol. 11, no. 3, pp. 243-250, 2022.
- [22] S. Poomsuk, B. Yooprasert, and P. Tangwiwat, Application of technology in cassava production by farmers in Chomphra district, Surin province,” *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 45, suppl. 1, pp. 1566-1570, 2017.
- [23] TGO, “Guidelines for Greenhouse Gas Emission Inventory at the Provincial,” [Online]. <https://www.tgo.or.th/2023/index.php/th/post>. [Accessed: Apr. 1, 2026].
- [24] *Technical Report*, Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles’ energy efficiency and overall CO₂ emissions, DG Climate Action, 2015.

คุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลเล็กซึ่งใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผสมโพลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารช่วยจุดระเบิดขณะสตาร์ทเครื่องยนต์

กิตติ เอี่ยมเปรมจิต*

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

98 หมู่ 8 ตำบลป่าป้อ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

รับบทความ 28 มีนาคม 2568 แก้ไขบทความ 4 พฤษภาคม 2569 ตอรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะและลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เมื่อใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผสมโพลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol: PEG) เป็นสารปรับปรุงค่าซีเทน (Ignition Improver) การทดสอบดำเนินการในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวแบบฉีดตรง ภายใต้สภาวะการสตาร์ทเครื่องยนต์ขณะไม่มีภาระ ที่ตำแหน่งคันเร่งสูงสุด โดยแปรผันความเข้มข้นของ PEG ในสัดส่วนร้อยละ 18 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของ PEG เป็นปัจจัยที่มีผลต่อขีดความสามารถในการติดเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ไม่สามารถสตาร์ทติดได้เมื่อสัดส่วนของ PEG ต่ำกว่าร้อยละ 18 จากการวิเคราะห์การเผาไหม้พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ PEG ส่งผลให้ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) เกิดการเผาไหม้ให้เร็วขึ้น (Advanced Combustion) และส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของจำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycles) ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสัดส่วนสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลภาคเกษตรกรรมต่อไป

คำสำคัญ : การเผาไหม้; เอทานอล; โพลิเอทิลีนไกลคอล; เครื่องยนต์ดีเซล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6802 5022, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kitti@rmutl.ac.th

Combustion Characteristics of a Small Diesel Engine Fueled with Ethanol and Polyethylene Glycol as Ignition Improver during Start of Engine

Kitti Iempremjit*

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna
98 Moo 8, Papong, Doisaket District, Chiangmai Province, 50220

Received 28 March 2025; Revised 4 May 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

This research aims to analyze the performance and combustion characteristics of a small diesel engine fueled by ethanol blended with Polyethylene Glycol (PEG) as an ignition improver. The experiments were conducted on a single-cylinder, Direct Injection (DI) diesel engine under no load and at maximum fuel position. The concentration of PEG was varied from 18% to 35% by weight. The experimental results revealed that the PEG proportion is a factor influencing engine startability; the engine failed to start when the PEG concentration was below 18%. Combustion analysis indicated that increasing the PEG concentration led to an advanced start of combustion (SOC) and a significant reduction in ignition delay. These improvements were directly correlated with a decrease in the number of misfire cycles. The findings of this study can serve as a guideline for determining the optimal additive proportions for utilizing ethanol in agricultural diesel engines.

Keywords : Combustion; Ethanol; Polyethylene Glycol; CI engine

* Corresponding Author. Tel.: +668 6802 5022, E-mail Address: kitti@rmutl.ac.th

1. บทนำ

ในสภาวะวิกฤตการณ์ด้านภูมิอากาศโลก การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคขนส่ง ถือเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการลดการพึ่งพาพลังงานที่ก่อให้เกิดคาร์บอนสูง เชื้อเพลิงเอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ จึงก้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในฐานะเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีศักยภาพสูง ทั้งในด้านความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงทางพลังงาน [1] ปัจจุบันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยมีการใช้เอทานอลอย่างกว้างขวาง จึงเป็นโอกาสอันดีในการประยุกต์ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล

การใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การผสมเอทานอลกับดีเซล (Diesel-ethanol fuel blends) การฉีดเชื้อเพลิงคู่ (Dual-fuel injection) การจ่ายเอทานอลผ่านท่อร่วมไอดี การใช้หัวเทียนหรือหัวเผาช่วยจุดระเบิด และการใช้สารช่วยจุดระเบิด (Ignition improvers) [2] ซึ่งวิธีหลังสุดนี้นับว่ามีความสะดวกเนื่องจากไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างเครื่องยนต์อย่างมีนัยสำคัญ การเติมสารช่วยจุดระเบิดจะช่วยเพิ่มค่าซีเทนให้แก่เอทานอล ทำให้สามารถเกิดการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้

งานวิจัยในระยะแรกมักใช้สารประกอบกลุ่มไนเตรท (Nitrate-based) ซึ่งจากการทดสอบพบว่าสาร Isoamyl Nitrate, Triethylene Glycol Dinitrate (TEGDN) และ Triethyl Ammonium Nitrate มีประสิทธิภาพสูงและผ่านเกณฑ์การประเมินด้านความปลอดภัยและเศรษฐศาสตร์ [3] อย่างไรก็ตาม สารกลุ่มไนเตรทส่งผลให้เกิดมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) สูง มีฤทธิ์กัดกร่อน และมีความเสี่ยงต่อการระเบิด จึงนำไปสู่การศึกษาสารช่วยจุดระเบิดกลุ่มที่ไม่เป็นสารประกอบไนเตรท (Non-nitrogen species) เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว

จากการศึกษาการใช้สารช่วยจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอล พบว่าการเติม Nitrate Ester (Avocet) ในสัดส่วนร้อยละ 4 โดยปริมาตร ส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยจุดระเบิดชนิดอื่น เช่น Isopropyl Nitrate และ Polyethylene Glycol (Beraid) [4]

นอกจากนี้ยังมีการใช้เครื่องยนต์จำลอง (RCEM) ศึกษา Glycerol Ethoxylate และเชื้อเพลิง ED95 ซึ่งพบว่าให้อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate) ใกล้เคียงกัน [5]

การศึกษาคูณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิด Glycerol Ethoxylate (GE) ในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวที่มีการปรับเพิ่มอัตราส่วนการอัดเป็น 23:1 ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าสัดส่วนต่ำสุดของสารช่วยจุดระเบิดที่สามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดการจุดระเบิดได้คือร้อยละ 13 ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วน GE สูงกว่าร้อยละ 24 พบว่าค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (IMEP) มีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงดีเซลร้อยละ 2.5 ถึง 3.0 นอกจากนี้ ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้มีค่าเบี่ยงเบนจากเชื้อเพลิงดีเซล 3.0 ถึง 3.8 และ 3.4 ถึง 8.8 องศาตามลำดับ โดยการเพิ่มสัดส่วนของ GE ส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) และจำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycles) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [6]

จากการศึกษาเปรียบเทียบคูณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 40 พบว่าสัดส่วนต่ำสุดของไบโอดีเซลที่สามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดการจุดระเบิดได้คือร้อยละ 18 ในด้านการทำงานของเครื่องยนต์พบว่า ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Injection Timing) ของทุกสัดส่วนผสมมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง -9 องศาหลังศูนย์ตายบน ($^{\circ}$ ATDC) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion) ของเชื้อเพลิงผสมแสดงให้เห็นถึงความ

ล่าช้ามากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล โดยอยู่ในช่วง 10 ถึง 28 องศาหลังจุดตายบน ทั้งนี้ การเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซลส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดที่รวดเร็วขึ้นและช่วยลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ได้อย่างต่อเนื่อง [7]

การใช้เครื่องยนต์จำลอง (Rapid Compression Machine) ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสม PEG400 (Ethanol 87% w/w และ PEG 400 13% w/w) โดยอากาศจะถูกบรรจุเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อนช่วงจังหวะการอัด ทั้งนี้ได้มีการทดสอบที่สัดส่วน 7% และ 10% ด้วยเช่นกัน แต่พบว่าไม่เกิดการเผาไหม้ที่สัดส่วน 7% และ 10% ผลการทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 20:1 จังหวะการฉีด (SOI) ที่ 33° BTDC เชื้อเพลิงจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าและมีการปลดปล่อยความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจังหวะการฉีดที่ 29 และ 25° BTDC ซึ่งการปลดปล่อยความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 25:1 ยิ่งจังหวะการเริ่มฉีดเชื้อเพลิงสูงขึ้น (ฉีดล่วงหน้ามากขึ้น) ค่าแรงดันสูงสุด (Pressure Peak) ก็จะมีสูงขึ้นตามไปด้วย และแรงดันสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นในจังหวะที่ใกล้กับศูนย์ตายบน (TDC) มากยิ่งขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนจังหวะการฉีดสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ [8], [9]

สารปรับปรุงการจุดระเบิดประเภทพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ Scania และ Volvo อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นในการศึกษาสารเติมแต่งทางเลือกอื่นที่น่าสนใจ โดยเฉพาะการใช้เครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งบนยานพาหนะ (On-board Reactor) เพื่อสังเคราะห์อีเทอร์จากเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) จากเอทานอล (EtOH) และไดเมทิลอีเทอร์ (DME) จากเมทานอล (MeOH) ได้ สารประกอบอีเทอร์ทั้งสองชนิดนี้มีค่าซีเทนสูงที่ 90 และ 60 ตามลำดับ จึงมีศักยภาพในการใช้เป็นสารปรับปรุงการจุดระเบิด นอกจากนี้ เครื่องยนต์ดีเซลของ Volvo สองรุ่น ได้แก่ รุ่น TD73 สำหรับรถบรรทุกทุกหนัก และรุ่น AH10A245

สำหรับรถโดยสาร ได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ โดยมีการปรับปรุงหลักคือการเพิ่มอัตราส่วนการอัด พร้อมทั้งขยายขนาดปั๊มเชื้อเพลิงและหัวฉีด ซึ่งเครื่องยนต์ทั้งสองรุ่นถูกออกแบบให้ใช้เอทานอลผสม PEG ในสัดส่วนร้อยละ 7 เป็นตัวเร่งการจุดระเบิด และต่อมาเครื่องยนต์โดยสารได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถใช้เชื้อเพลิงอีเทอร์ร่วมด้วย [10]

เนื่องจากสารช่วยจุดระเบิด Glycerol Ethoxylate มีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูง โพลีเอทิลีนไกลคอล จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์และเทคนิค เนื่องจากมีราคาประหยัดและมีคุณสมบัติในการลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสม PEG400 ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก โดยเฉพาะในช่วงสภาวะการเริ่มเดินเครื่องยนต์ ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสัดส่วนสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลภาคเกษตรกรรมต่อไป

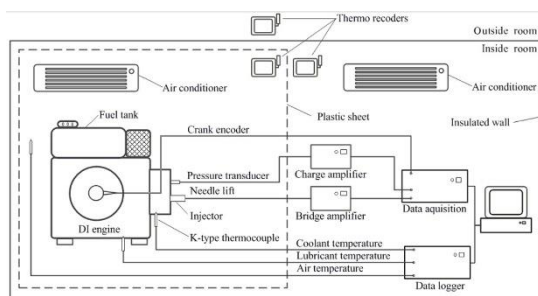
2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ใช้ PEG400 เป็นสารช่วยจุดระเบิดผสมกับเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 35 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง [6], [7], [11]

Properties	Ethanol	PEG400	Diesel
*Viscosity (cP)	1.19 @20 °C	45.65 @40 °C	4.35 @20 °C
Density (kg/m ³)	0.785	1.130	0.832
LHV (MJ/kg)	26.8	23.5	42.6
Cetane number	5	N/A	55
Flash point (°C)	13.5	N/A	60

* ค่า Viscosity มีค่าแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 1 แผนภาพการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบ เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล Kubota รุ่น RT140 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ประเภทฉีดตรง (Direct Injection) ระบายความร้อนด้วยน้ำ มีขนาดกระบอกสูบและระยะชักเท่ากับ 97 x 96 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระบบจ่ายเชื้อเพลิงประกอบด้วยปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบ Port and Helix และหัวฉีดเชื้อเพลิงชนิด 4 รู (4-hole injector nozzle) ทั้งนี้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เครื่องยนต์จึงได้รับการดัดแปลงเพื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด (Compression Ratio) จากมาตรฐานเป็น 23:1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบแสดงในตารางที่ 2

เครื่องยนต์ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouple) จำนวน 3 ชุด เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Keyence รุ่น NR-TH08 เพื่อจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเครื่องยนต์ น้ำหล่อเย็น และน้ำมันหล่อลื่น ใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิและสภาวะบรรยากาศ (Thermo Recorder) รุ่น TR-73U ในการตรวจวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ โดยทำการวัดรวมทั้งสิ้น 3 จุด ได้แก่ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วน และภายนอกห้องควบคุมอุณหภูมิ การวัดตำแหน่งการยกตัวของเข็มหัวฉีดดำเนินการโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนที่ (Inductive Needle Lift Transducer) ร่วมกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Bridge Amplifier) ยี่ห้อ AVL รุ่น 3010A01 ติดตั้ง

เซนเซอร์วัดความดันชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Pressure Sensor) ยี่ห้อ Kistler รุ่น PiezoStar® Type 6052C เพื่อวัดค่าความดันภายในกระบอกสูบ ข้อมูลจากการยกตัวของเข็มหัวฉีดและความดันในกระบอกสูบ จะถูกรวบรวมและจัดเก็บผ่านระบบจัดเก็บข้อมูลสมรรถนะสูง (Data Acquisition System) ยี่ห้อ KiBox รุ่น Type 2893AK8

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ [12]

Engine model	Kubota RT140
Bore x Stroke (mm)	97 x 96
Displacement volume (cm ³)	709
Compression ratio (modified)	23:1
Injection pressure (bar)	210
Max. power (kW)/rpm	10.3 / 2,400
Max. torque (kg-m)/rpm	5.0 / 1,600

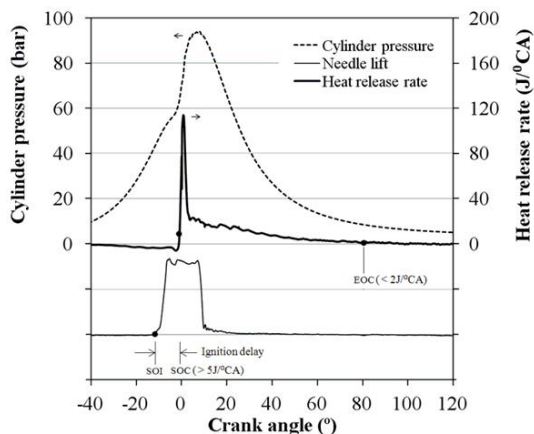
การทดลองดำเนินการในห้องควบคุมอุณหภูมิถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยม่านพลาสติก ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วนติดตั้งเครื่องปรับอากาศและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิควบคุมขณะติดเครื่องยนต์

เนื่องจากเอทานอลมีความสามารถในการหล่อลื่นต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความทนทานของปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูง จึงมีการเติมกรดลอริก (Lauric Acid) ในสัดส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่น (Lubricity Additive) ให้แก่ชุดอุปกรณ์ฉีดจ่ายเชื้อเพลิง [13] หลังจากนั้นนำเอทานอลผสมกับโพลีเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนที่ต้องการ เช่น เอทานอลผสมกับโพลีเอทิลีนไกลคอล 2% จะเรียกว่า PEG02

เครื่องยนต์และถังบรรจุเชื้อเพลิงจะถูกติดตั้งภายในห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม (Environmental Chamber) เพื่อปรับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาในการ

รักษาอุณหภูมิ (Soaking period) อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนเริ่มดำเนินการทดสอบการติดเครื่องยนต์ ในทุกชุด การทดลอง คั่นบังคับควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ จะถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งภาระสูงสุด (Maximum Fuel Position) เพื่อควบคุมตัวแปรด้านการจ่าย เชื้อเพลิงให้คงที่ การเริ่มเดินเครื่องยนต์จะดำเนินการ ผ่านมอเตอร์สตาร์ท (Starter Motor) โดยกำหนด ระยะเวลาในการลากจูงเครื่องยนต์ (Cranking) เป็น เวลา 5 วินาทีต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง กรณีที่เครื่องยนต์ สามารถจุดระเบิดและเริ่มทำงานได้ ระบบจะดำเนินการ บันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วัฏ จักรการทำงานแรก (Cycle No. 1) จนกระทั่งครบวัฏ จักรที่ 200 (Cycle No. 200)

การทดสอบการแยกชั้นของเชื้อเพลิง ตัวอย่าง เชื้อเพลิงผสมถูกเก็บรักษาไว้ในสภาวะควบคุม ณ อุณหภูมิห้อง ในบริเวณที่ปราศจากแรงสั่นสะเทือนเป็น ระยะเวลา 3 เดือน จากการตรวจสอบลักษณะทาง กายภาพด้วยสายตา (Visual Inspection) ไม่พบการ แยกชั้นของเชื้อเพลิง (Phase Separation) หรือการ เปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างตลอดช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 2 ลักษณะความดันภายในกระบอกสูบ อัตราการ ปลดปล่อยความร้อนและสัญญาณการยกตัวของเข็ม หัวฉีดเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ภายในกระบอกสูบ (Cylinder Pressure) อัตราการ ปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate: HRR) และ สัญญาณการยกตัวของเข็มหัวฉีด (Needle Lift Signal) ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดถูกระบุจากจุดบนกราฟสัญญาณ การยกตัวของเข็มหัวฉีด โดยใช้วิธีอนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative) เพื่อระบุจุดเริ่มต้นการยกตัวของ เข็มหัวฉีด

จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) กำหนดจาก ตำแหน่งที่มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่า $5\text{ J}/^{\circ}\text{CA}$ จุดสิ้นสุดการเผาไหม้ (EOC) กำหนดจากตำแหน่ง ที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลงต่ำกว่า $2\text{ J}/^{\circ}\text{CA}$ ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ID) คำนวณจากผลต่าง ระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และตำแหน่งเริ่มต้น การฉีดเชื้อเพลิง (SOC - SOI) ระยะเวลาหน่วงการจุด ระเบิดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการจัดลำดับเฟสของ การเผาไหม้ (Phasing of Combustion) โดยหาก ช่วงเวลาหน่วงมีค่ามาก จะส่งผลให้ระดับการผสม ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงและอากาศ (Degree of Premixing) เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกิดการจุดระเบิดจะทำให้ อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในห้องเผาไหม้สูง (High Pressure Rise Rate) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ เครื่องยนต์เกิดการสั่นสะเทือนและมีเสียงดัง [14]

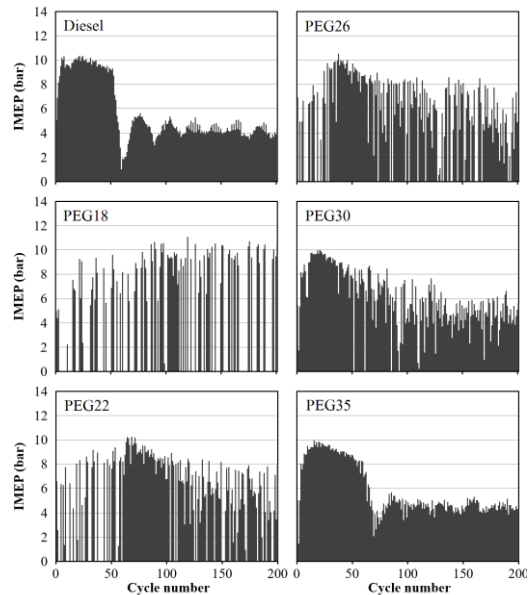
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบพบว่าการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่มี ส่วนผสมของสารช่วยจุดระเบิด (PEG) ในสัดส่วนที่ต่ำกว่าร้อยละ 18 ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่สามารถ ดำเนินการจุดระเบิดได้ ด้วยเหตุนี้ PEG18 จึงถูก กำหนดให้เป็นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของสัดส่วนสารช่วยจุด ระเบิดที่เพียงพอต่อการเริ่มเดินเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะ การทดสอบดังกล่าว

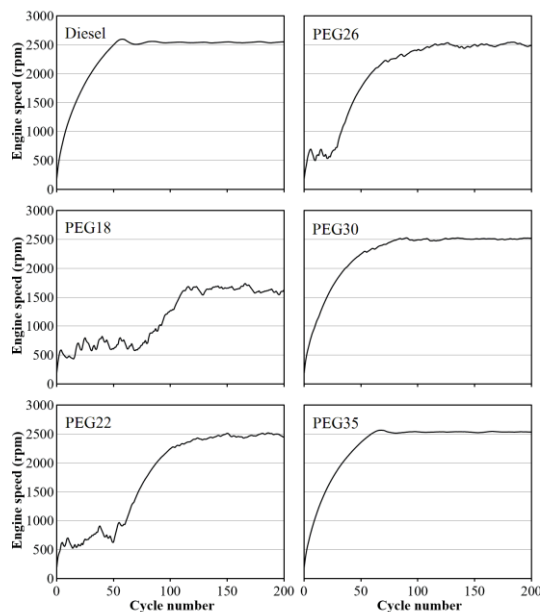
รูปที่ 3 จากการวิเคราะห์ค่าความดันเฉลี่ย ประสิทธิภาพในช่วง 200 วัฏจักรแรกของการใช้เชื้อเพลิง

ดีเซล พบพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะหลักตามลักษณะการควบคุมความเร็วรอบ คือ วัฏจักรที่ 1 – 50 (Cycle No. 1 - Cycle No. 50) ช่วงเริ่มต้น ค่า IMEP มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเครื่องยนต์ยังมีความเร็วรอบต่ำ ส่งผลให้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Governor) สั่งการเพิ่มปริมาณการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเร่งความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะการทำงาน วัฏจักรที่ 51 – 75 (Cycle No. 51 - Cycle No. 75) ระยะชะลอความเร็วรอบ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจนใกล้ถึงค่าที่กำหนด อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะปรับลดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงลง เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วรอบสูงเกินกำหนด (Overshoot) ส่งผลให้ค่า IMEP เริ่มมีแนวโน้มลดลง วัฏจักรที่ 76 - 200 (Cycle No. 76 - Cycle No. 200) ระยะความเร็วรอบคงที่ (Steady-state Operation) เป็นระยะที่อุปกรณ์ควบคุมสามารถรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่ตามสภาวะที่ตั้งไว้ตลอดการทำงาน

จากการพิจารณาค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (IMEP) ในช่วง 200 วัฏจักรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงค่า IMEP สูงกว่าเชื้อเพลิงกลุ่ม PEG อย่างมีนัยสำคัญ และไม่ปรากฏวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycle) ตลอดช่วงการทดสอบทั้ง 200 วัฏจักร ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพในการจุดระเบิดที่สูงกว่า เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PEG ส่งผลให้ค่า IMEP และความเร็วรอบเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับดังที่ปรากฏใน รูปที่ 4 เมื่อสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 30 (PEG30) พบว่าค่า IMEP และความเร็วรอบเครื่องยนต์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่และมีค่าใกล้เคียงกับสมรรถนะของเชื้อเพลิงดีเซล

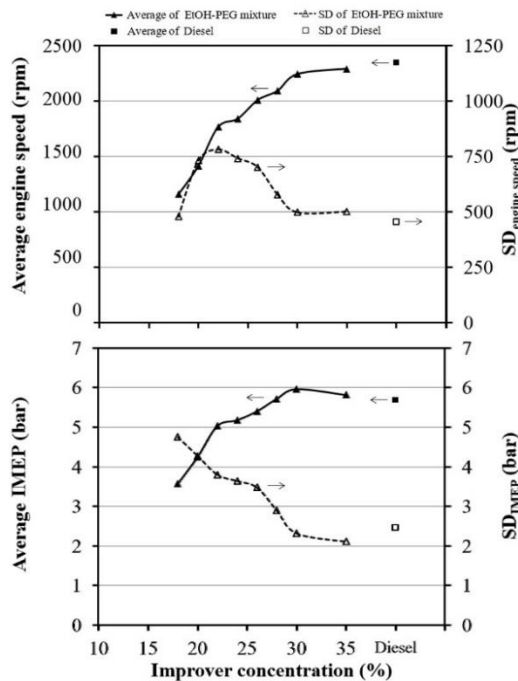


รูปที่ 3 ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) ช่วง 200 วัฏจักรแรก



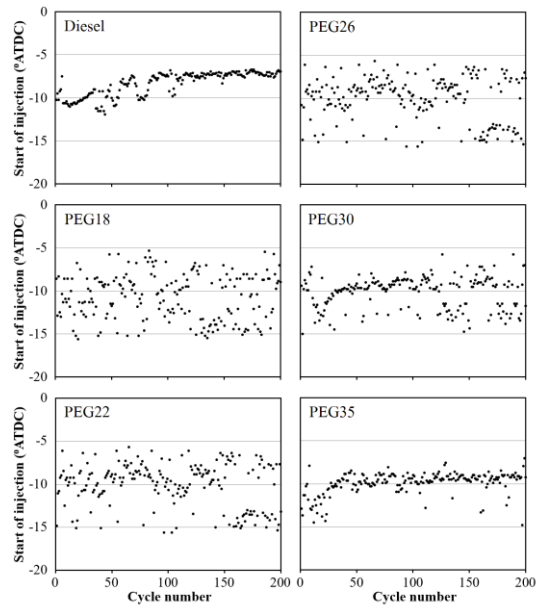
รูปที่ 4 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ช่วง 200 วัฏจักรแรก

ผลการทดสอบความเร็วรอบเครื่องยนต์ในช่วง 200 วิวัจกรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงสมรรถนะการตอบสนองที่เสถียร โดยมีค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงสุดคงที่ที่ประมาณ 2,500 rpm ตลอดช่วงการทดสอบ



รูปที่ 5 ความเร็วรอบเครื่องยนต์และ IMEP เฉลี่ยในช่วง 200 วิวัจกรแรก

รูปที่ 5 แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบและ IMEP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิดสูงกว่าร้อยละ 30 สมรรถนะของเครื่องยนต์จะอยู่ในระดับที่เทียบเคียงได้กับการใช้เชื้อเพลิงดีเซล การเพิ่มสัดส่วน PEG ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของทั้งความเร็วรอบและ IMEP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารช่วยจุดระเบิดไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มสมรรถนะในเชิงปริมาณเท่านั้น แต่ยังช่วยลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเพิ่มเสถียรภาพในการจุดระเบิดให้มากขึ้น



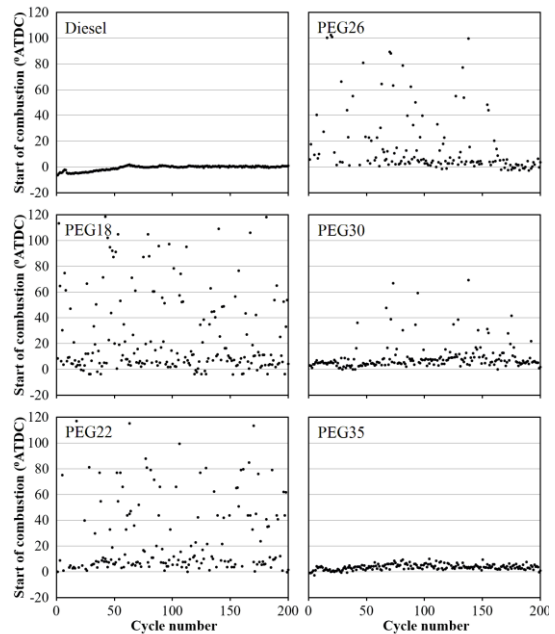
รูปที่ 6 ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI)

รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of Injection: SOI) ในช่วง 200 วิวัจกรแรก พบว่าตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในช่วง -16 ถึง -5 ° ATDC ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลอย่างชัดเจน ความไม่คงที่ของจังหวะการฉีดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) ให้มีความแปรปรวนสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้น พบว่าความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งช่วยส่งเสริมให้กระบวนการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงมีความคงที่มากยิ่งขึ้น

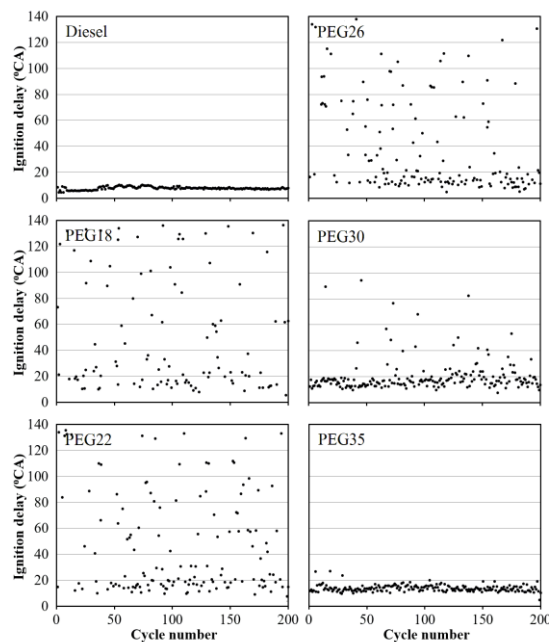
รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) ในช่วง 200 วิวัจกรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลปรากฏบริเวณใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top Dead Center: TDC) โดยมีส่วนค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในระดับที่ต่ำมาก ซึ่งบ่งชี้ถึงเสถียรภาพในการจุดระเบิดที่สมบูรณ์ เชื้อเพลิง PEG18 พบความแปรปรวนของตำแหน่ง

เริ่มต้นการเผาไหม้ในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) และสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่คงที่ในช่วงเริ่มเดินเครื่องยนต์ การเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ โดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการจุดระเบิดให้เข้าใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบนมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้มีเสถียรภาพเทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล

รูปที่ 8 แสดงช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ในช่วง 200 วัฏจักรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดในระดับต่ำมาก ในขณะที่เชื้อเพลิง PEG18 พบความแปรปรวนในระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้น ความแปรปรวนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Standard Deviation of Ignition Delay: SD_{ID}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.54° , 28.14° , 17.94° , 13.20° และ 5.36° สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล, PEG18, PEG22, PEG26 และ PEG30 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงเสถียรภาพการจุดระเบิดที่ชัดเจนตามปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เชื้อเพลิงเอทานอลที่มีสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดต่ำ จะส่งผลให้เกิดความไม่คงที่ (Instability) ในระดับสูง ทั้งในด้านตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) อย่างไรก็ตาม การผสมสารช่วยจุดระเบิดในสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไปสามารถลดความเบี่ยงเบนทางวัฏจักรดังกล่าวให้ลงมาอยู่ในระดับที่เทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 7 ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC)

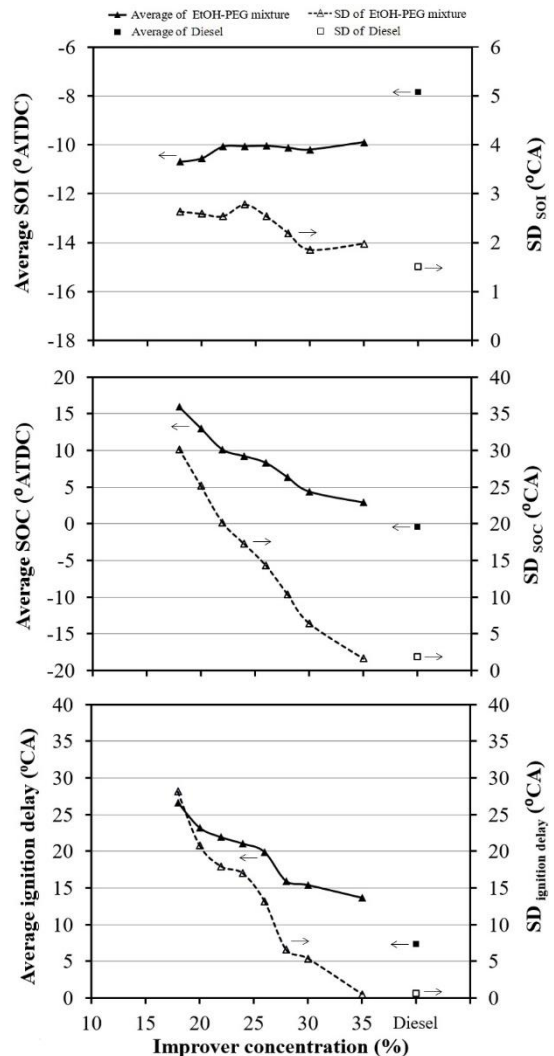


รูปที่ 8 ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ID)

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ตลอด 200 วิวัจจักรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงเฉลี่ยของเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดในทุกสัดส่วนความเข้มข้น ปรากฏอยู่ในช่วง -11 ถึง -10 °ATDC ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SD_{SOI}) มีค่าอยู่ในช่วง 1.85° ถึง 2.78°

ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดปรากฏอยู่ในช่วง 3 ถึง 16° ATDC ซึ่งแสดงถึงสภาวะการเผาไหม้ที่ล่าช้า (Delayed Combustion) อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งมีตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ใกล้จุดศูนย์ตายบน (TDC) การเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดส่งผลให้จังหวะการเผาไหม้เกิดขึ้นเร็วขึ้น (Advanced Combustion) และส่งผลโดยตรงต่อการลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) แม้จะมีการเพิ่มส่วนผสมของสารช่วยจุดระเบิดจนถึงระดับ PEG35 แต่ระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิดยังคงอยู่ที่ 13° ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลที่มีค่าเพียง 7° ความแตกต่างที่มีนัยสำคัญนี้ชี้ให้เห็นว่าลำพังการใช้สารเติมแต่งอาจยังไม่เพียงพอต่อการบรรลุสมรรถนะการเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุด

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซล การศึกษาในระยะต่อไปควรประยุกต์ใช้กลยุทธ์อื่นร่วมด้วย อาทิ การอุ่นไอดีหรือห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber Pre-heating) และการปรับเพิ่มอัตราส่วนการอัด (Increasing Compression Ratio) เพื่อลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิดและยกระดับสมรรถนะการเริ่มเดินเครื่องยนต์ให้ทัดเทียมกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด

4. สรุป

สัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิด (Ignition Improver) ขั้นต่ำที่สามารถติดเครื่องยนต์ได้ คือร้อยละ 18 ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นจนสูงกว่าร้อยละ 30 พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบและค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพ (IMEP) จะมีระดับสมรรถนะที่เทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล

ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ของทุกสภาวะการทดสอบปรากฏอยู่ในช่วง -11 ถึง -10 °ATDC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการฉีดมีความคงที่และเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิด

ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดอยู่ในช่วง 3 ถึง 16 °ATDC ซึ่งบ่งชี้ถึงสภาวะการเผาไหม้ที่ล่าช้า (Delayed Combustion) เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล อย่างไรก็ตาม การเพิ่มสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการเร่งจังหวะการเผาไหม้ให้เร็วขึ้น (Advanced Combustion) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. A. Stein, J. E. Anderson, and T. J. Wallington, "An overview of the effects of ethanol-gasoline blends on SI engine performance, fuel efficiency, and emissions," *SAE International Journal of Engines*, vol. 6, no. 1, pp. 470-487, Apr. 2013.
- [2] E. E. Eugene, R. L. Bechtold, T. J. Timbario, and P. W. McCallum, "State-of-the-art report on the use of alcohols in diesel engines," *SAE Technical Paper*, pp. 684-702, 1984.
- [3] A. J. Schaefer and H. O. Hardenberg, "Ignition improvers for ethanol fuels," *SAE Technical Paper*, pp. 1107-1118, 1981.
- [4] H. Simonsen and J. Chomiak, "Testing and evaluation of ignition improvers for ethanol in a DI diesel engine," *SAE transactions, Journal of Fuels & Lubricants*, pp. 1861-1872, 1995.
- [5] R. Munsin, Y. Laoonual, S. Jugjai, M. Matsuki, and H. Kosaka, "Investigation of effects of ignition improvers on ignition delay time of ethanol combustion with rapid compression and expansion machine," *SAE Technical Paper*, no. 2012-01-0854, 2012.
- [6] K. Iempremjit, "Combustion Characteristics of Ethanol with Ignition Improver in a Small Diesel Engine during Start-up," *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol. 13 no. 1, pp. 226-243, 2021.
- [7] K. Iempremjit, "Effect of Biodiesel-ethanol Fuel Blends on Performance and Combustion Characteristics in a Small Diesel Engine during Start of Engine", *Engineering and Technology Horizons*, vol. 38, no. 3, pp. 24-32, 2021.
- [8] F. Z. Sánchez, C. V. Braga, S. L. Braga, F. G. Dias, F. Y. Turkovics, M. L. Airolidi, and R. N. De Souza, "Experimental study of combustion for mixtures of ethanol and ignition improvers in a rapid compression machine," *SAE Technical Paper*, no. 2015-36-0090, 2015.
- [9] F. Z. Sánchez, A. R. de Aguiar Martins, C. V. Braga, S. L. Braga, F. Y. Turkovics, and R. N. Pradelle, "Study of effects of ignition improvers on ethanol compression ignition in the rapid compression machine," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42 no. 9, pp. 494, 2020.

- [10] E. Olsson, S. Hiljemark, and S. Gjirja, "Use of alternative fuels in heavy duty engines," in *Proceedings of the Twenty sixth Joint Meeting of The Scandinavian-Nordic and Italian Sections of The Combustion Institute*, Göteborg, Sweden, 2003. pp. 18-21.
- [11] S. Lee, T. Y. Kim, and K. Y. Kang, "A feasibility study of using pyrolysis oil/butanol blended fuel in a DI diesel engine," *SAE Technical Paper* no. 2015-24-2437, 2015.
- [12] Siam Kubota Corporation Co., Ltd., "Specification: KUBOTA Diesel Engine," [Online]. Available: https://www.siamkubota.co.th/diesel-engine/distribution/public/frontend/assets/file/AWCatalogueNC-DE_eng_c-min.pdf. [Accessed: Aug. 7, 2024].
- [13] A. S. Bika, L. M. Franklin, and D. B. Kittelson, "Hydrogen as a combustion modifier of ethanol in compression ignition engines," *SAE Technical Paper* no. 2009-01-2814, 2009.
- [14] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2018.

ผลผลิตชีวมวลและสารต้านอนุมูลอิสระจากสาหร่ายทะเลขนาดเล็ก *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ภายใต้การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง

นารินทร์ จันทรสว่าง* เบญจวรรณ ประไพโร และ พลช อาจสามารถ

ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

รับบทความ 22 ตุลาคม 2568 แก้ไขบทความ 7 พฤษภาคม 2569 ตอรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายขนาดเล็ก *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ภายใต้การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง ด้วยถังพลาสติกสีขาวทรงสี่เหลี่ยมปริมาตร 600 ลิตร ระยะเวลา 9 วัน ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นจาก 0.10 ในวันแรกเป็น 0.50 ในวันที่ 9 ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.58 ต่อวันในวันที่ 1 ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจาก 8.54 เป็น 9.33 และความเค็มเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 19 ppt ซึ่งสัมพันธ์กับกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงและการระเหยของน้ำในสภาวะกลางแจ้ง ผลผลิตชีวมวลอยู่ที่ 1,275 กรัมสด หรือ 24.84 กรัมแห้ง คิดเป็นผลผลิตเฉลี่ย 0.81 กรัม/น้ำหนักระยะต่อตารางเมตรต่อวัน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีพบว่าสาหร่ายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* 2.47 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และแคโรทีนอยด์รวม 1.90 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีน 11.48 ± 0.95 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และคาร์โบไฮเดรต 127.46 ± 17.41 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง นอกจากนี้พบปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด 5.29 ± 0.02 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และฟลาโวนอยด์ทั้งหมด 16.66 ± 2.17 มิลลิกรัม เควอเซตินต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยง *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ในระบบกลางแจ้ง อย่างไรก็ตามในการศึกษาต่อไปยังมีความจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมเพิ่มเติม เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ และองค์ประกอบของสารอาหาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ความสม่ำเสมอของผลผลิต และศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : สาหร่ายขนาดเล็ก; สาหร่าย *Tisochrysis*; การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง; สารต้านอนุมูลอิสระ

Biomass Productivity and Antioxidant Composition of Marine Microalga *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 Under Outdoor Cultivation Condition

Narin Chansawang* Benjawan Praprai and Palod Artsamart

Biodiversity Research Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research
35 Mu 3 Technopolis, Khlong 5, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

Received 22 October 2025; Revised 7 May 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

This study aimed to evaluate the growth performance and biochemical composition of the marine microalga *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 cultivated under outdoor cultivation using white rectangular plastic tanks with a volume of 600 L over a 9-day period. The results revealed a continuous increase in cell density, as indicated by the optical density at 750 nm (OD_{750}), which rose from 0.10 on day 1 to 0.50 on day 9. The culture exhibited a highest specific growth rate of 0.58 day^{-1} at day 1, reflecting efficient photosynthetic adaptation under outdoor conditions. The pH increased from 8.54 to 9.33, while salinity rose from 15 to 19 ppt, which was associated with photosynthetic activity and water evaporation under outdoor conditions. The total biomass yield reached 1,275 g (fresh weight) or 24.84 g (dry weight; DW.), with an average productivity of $0.81 \text{ g DW m}^{-2}\text{day}^{-1}$. Biochemical analysis revealed that the microalgal biomass contained chlorophyll *a* at $2.47 \pm 0.03 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ and total carotenoids at $1.90 \pm 0.23 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$. The protein content was $11.48 \pm 0.95 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$ and carbohydrate content was $127.46 \pm 17.41 \text{ mg g}^{-1} \text{ DW}$. Additionally, total phenolic content was $5.29 \pm 0.02 \text{ mg gallic acid equivalent (GAE) g}^{-1} \text{ DW}$, and total flavonoid content was $16.66 \pm 2.17 \text{ mg quercetin equivalent (QE) g}^{-1} \text{ DW}$, indicating a high level of antioxidant potential. The results of this study indicate the feasibility of cultivating *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 in outdoor systems. However, further investigations are required to optimize key cultivation parameters, such as light intensity, temperature, and nutrient composition, in order to enhance growth performance, ensure production consistency, and improve its potential for industrial-scale applications.

Keywords : Microalgae; *Tisochrysis*; Outdoor Cultivation; Aquaculture; Antioxidants

* Corresponding Author. Tel.: +668 5159 9854, E-mail Address: narin_c@tistr.or.th

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Aquaculture) มีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อความมั่นคงทางอาหารของโลก โดยมีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์น้ำเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย วัตถุดิบหลักที่นิยมใช้ เช่น ปลาป่น (Fish Meal) และน้ำมันปลา (Fish Oil) มีข้อจำกัดในด้านความยั่งยืนของทรัพยากรทางทะเล ต้นทุนการผลิตที่สูง และความผันผวนของราคา ทำให้เกิดความจำเป็นในการแสวงหาแหล่งวัตถุดิบทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะวัตถุดิบทดแทนหรือเสริมในสูตรอาหารสัตว์น้ำ เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กมีการเจริญเติบโตเร็ว สามารถเพาะเลี้ยงได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญ เช่น โปรตีน ไขมัน กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fatty Acids; PUFAs) วิตามิน แร่ธาตุ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive Compounds) หลายชนิดที่มีคุณสมบัติส่งเสริมสุขภาพสัตว์น้ำ [2] ในกลุ่มสาหร่ายน้ำเค็มที่มีศักยภาพสูง สกุล *Tisochrysis* หรือ *Isochrysis* (รวมถึงชนิดที่เคยถูกจัดเรียกว่า *Tisochrysis lutea* หรือ “*T-iso*”) เป็นสาหร่ายสีทอง (Haptophyte) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะในการเลี้ยงระยะตัวอ่อนของหอย กุ้ง และลูกปลา เนื่องจากมีโครงสร้างเซลล์ขนาดเล็ก เหมาะสมต่อการย่อย มีองค์ประกอบทางเคมีที่ครบถ้วน เช่น กรดไขมันโดโคซาเฮกซาอีโนอิก (Docosahexaenoic Acid; DHA) และสารสีแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ [2] สาหร่าย *Tisochrysis lutea* เพาะเลี้ยงถึงปฏิกรณ์ขนาด 500 ลิตร นำไปเป็นอาหารให้กับลูกหอยนางรม [3] *T. lutea* ที่อุดมด้วย DHA อาจมีศักยภาพในการช่วยป้องกันโรคอ้วน และปรับปรุงการเผาผลาญไขมันและน้ำตาลในร่างกายได้เนื่องจากพบว่า

การเสริม *T. lutea* ให้กับหนูที่กระตุ้นให้เป็นโรคอ้วนนั้นช่วยลดน้ำหนักตัว ระดับน้ำตาล และอินซูลินในเลือด พร้อมทั้งลดปริมาณไขมันในร่างกายและไขมันสะสมในตับ อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงระดับไขมันในเลือดบางชนิดและลดสารก่อการอักเสบ [4] นอกจากนี้องค์ประกอบทางโภชนาการแล้ว สาหร่ายในสกุล *Isochrysis* หรือ *Tisochrysis* ยังพบว่ามีสารฟีนอล (Polyphenols) และสารกลุ่มฟีนอลิก (Phenolic Compounds) ซึ่งเป็นสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary Metabolites) ที่มีบทบาทสำคัญในการปกป้องเซลล์จากความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative Stress) และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่โดดเด่น [5] การศึกษาปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Content) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสาหร่ายทะเลหลายชนิด เช่น *Isochrysis galbana*, *Nannochloropsis* sp. และ *Tetraselmis* sp. พบว่าสาหร่ายนั้นสามารถสะสมสารฟีนอลิกได้ในระดับที่มีนัยสำคัญต่อการใช้ประโยชน์เชิงโภชนาการและชีวเวชภัณฑ์ [5], [6] อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่มุ่งเน้นการเพาะเลี้ยง *Tisochrysis* sp. ใน การเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง (Outdoor Cultivation) เพื่อประเมินองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณสารฟีนอลิก/ฟลาโวนอยด์ ยังมีอยู่อย่างจำกัด ระบบกลางแจ้งมีความท้าทายด้านการควบคุมปัจจัยแวดล้อม เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ ปริมาณสารอาหารและความเค็ม ซึ่งส่งผลต่อการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลและเมแทบอไลต์ทุติยภูมิภายในเซลล์สาหร่ายโดยตรง การทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเพาะเลี้ยงกับองค์ประกอบทางเคมีและสารต้านอนุมูลอิสระ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระดับอุตสาหกรรมที่ให้ผลผลิตทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายน้ำเค็มขนาดเล็ก *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ในระบบกลางแจ้งขนาด 600 ลิตร เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล (เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต) รวมถึงปริมาณสารฟีนอลิก

และฟลาโวนอยด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะประเมินศักยภาพของสาหร่ายชนิดนี้ ในฐานะวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และอาจส่งเสริมสุขภาพของสัตว์น้ำในระบบการเพาะเลี้ยงได้อย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย

นำสายพันธุ์สาหร่ายน้ำเค็มขนาดเล็ก *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 จากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านสาหร่าย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร F/2 [7] ในขวดรูปชมพูนขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีปริมาตรอาหาร 150 มิลลิลิตร ให้ความเข้มข้นที่ 50 ± 10 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 28 ± 1 องศาเซลเซียส เขย่าต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ระยะเวลา 5-7 วัน จากนั้นขยายหัวเชื้อเพื่อเพิ่มปริมาณโดยเพาะเลี้ยงสาหร่ายในถังคาร์บอยขนาด 10 ลิตร ที่มีปริมาตรอาหาร 7 ลิตร ด้วยอาหารสูตรดัดแปลงของ F/2 ที่ใช้น้ำทะเลเทียมโดยเติมเกลือ (NaCl) 19.957 กรัมต่อลิตร มีความเค็มที่ 15 ppt เพาะเลี้ยงนาน 5-7 วัน ได้ระยะแบ่งตัวทวีคูณ (Exponential Phase) สำหรับเป็นหัวเชื้อ (Stock Culture) ก่อนนำมาศึกษาต่อไป

2.2 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายกลางแจ้ง

เพาะเลี้ยงสาหร่ายในถังพลาสติกสีขาวทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร สูง 116 เซนติเมตร (รูปที่ 1) ด้วยอาหารดัดแปลงสูตร F/2 ที่ใช้น้ำทะเลเทียมโดยเติมเกลือ 19.957 กรัมต่อลิตร ค่าความเค็มที่ 15 ppt เพาะเลี้ยงจำนวน 2 ถึง ปริมาตรอาหารถังละ 600 ลิตร เติมหหัวเชื้อสาหร่ายโดยใช้ปริมาณตั้งต้น 7 เปอร์เซ็นต์ของ

อาหาร ถึงเพาะเลี้ยงสาหร่ายวางกลางแจ้งที่มีหลังคาคลุมด้วยตาข่ายกรองแสง 60 เปอร์เซ็นต์ ความสว่าง:มีดของแสงอาทิตย์เป็น 12:12 ชั่วโมง มีการให้อากาศตลอดเวลาเพื่อไม่ให้สาหร่ายตกตะกอน เก็บสถิติอุณหภูมิของอากาศและอาหารเพาะเลี้ยงในถังด้วยเทอร์โมมิเตอร์ 2 ช่วงเวลา ได้แก่ 9.00 และ 16.00 นาฬิกา เก็บตัวอย่าง 3 จุดของถัง จุดละ 100 มิลลิลิตร เพื่อทำการเจริญเติบโตด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร (Hitachi, U-2900, Japan) เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บเซลล์สาหร่ายด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 6,000-7,000 รอบต่อนาที (Evodos, Type 10, Germany) จากนั้นซังน้ำหนักราชสาหร่ายสด และนำไปอบในตู้อบ (Mettler, UF 450, Germany) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 7-8 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งแห้งเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 1 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ในถังพลาสติกสีขาวทรงสี่เหลี่ยม ขนาดปริมาตรอาหาร 600 ลิตร ให้อากาศตลอด 24 ชม. และลักษณะสีของอาหารเพาะเลี้ยงสาหร่ายอายุ 9 วัน (บนซ้ายมือ)

2.3 การวัดการเจริญเติบโต

วัดค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย โดยเก็บตัวอย่าง 3 จุดของแต่ละถังเพาะเลี้ยงสาหร่าย แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density; OD) ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Hitachi, U-2900, Japan) ที่ความยาวคลื่นแสง 750 นาโนเมตร คำนวณประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสาหร่าย ด้วยอัตรา

การเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate: μ) [8]
การผลิ ต ชีวมวล (Biomass) และ ผลผลิต (Productivity) [9] คำนวณดังสมการ (1), (2), (3)

$$\mu = \ln(OD_1/OD_0) / (t_1 - t_0) \quad (1)$$

$$\text{Biomass per Unit Area} = (X_1 - X_0) / \text{Area} \quad (2)$$

$$\text{Productivity} = \text{Biomass per Unit Area} / \text{Culture time} \quad (3)$$

โดยที่

μ = อัตราการเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)

OD_0 = ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในวันเริ่มต้น

OD_1 = ค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่ายในวันสุดท้าย

t_0 = เวลาของวันเริ่มต้นที่เก็บเซลล์สาหร่าย (วัน)

t_1 = เวลาของวันสุดท้ายที่เก็บเซลล์สาหร่าย (วัน)

X_0 = น้ำหนักสาหร่ายเริ่มต้น (กรัมแห้ง)

X_1 = น้ำหนักสาหร่ายสุดท้าย (กรัมแห้ง)

Biomass per Unit Area = ชีวมวลสาหร่าย (กรัมแห้ง
สาหร่ายต่อตารางเมตร)

DW = น้ำหนักแห้งสาหร่าย (กรัม)

Productivity = ผลผลิต (กรัมแห้งสาหร่ายต่อตาราง
เมตรต่อวัน)

Area = พื้นที่ผิวของถังเพาะเลี้ยง (ตารางเมตร)

Culture time = จำนวนวันที่เพาะเลี้ยง (วัน)

2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

2.4.1 การหาปริมาณสารสี

การหาปริมาณสารสี [10] โดยชั่งสาหร่ายแห้ง บดละเอียด 0.05 กรัม ลงในหลอดสกัดตัวอย่างที่มีเม็ด ปิดขนาด 1-2 มิลลิเมตร เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำหลอดตัวอย่างเข้าเครื่องทำให้ เซลล์แตก (Bead-beater, Biospec Product, USA) ที่ความเร็วรอบ 2,400 รอบต่อนาที นาน 20 วินาที แล้ว ปั่นเหวี่ยงที่ 8,000 รอบต่อนาที (Prism R™, Labnet International Inc., USA) นาน 6 นาที เก็บของเหลว

ส่วนบน ทำการสกัดซ้ำ 3 ครั้ง แล้วเก็บของเหลวส่วนบน มารวมกัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470, 648 และ 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการ ดูดกลืนแสง (Hitachi, U-2900, Japan) ปริมาณ คลอโรฟิลล์ เอ บี และแคโรทีนอยด์รวม คำนวณดัง สมการ (4, 5, 6)

$$\text{Chl } a = 13.36 \times A_{664} - 5.19 \times A_{648} \quad (4)$$

$$\text{Chl } b = 27.43 \times A_{648} - 8.12 \times A_{664} \quad (5)$$

$$\text{Total-car} = (1000 \times A_{470} - 1.63 \times \text{chl } a - 104.96 \times \text{chl } b) / 221 \quad (6)$$

โดยที่

Chl *a* = คลอโรฟิลล์ เอ (มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง)

Chl *b* = คลอโรฟิลล์ บี (มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง)

Total-car = แคโรทีนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง)

2.4.2 การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธี Phenol-sulfuric acid [11] โดยชั่งสาหร่าย 1 กรัม เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปต้มด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที (TOMY Autoclaves, SX-700, Japan) วางไว้ให้เย็น ที่ อุณหภูมิห้องแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที (Prism R™, Labnet International Inc., USA) เป็น เวลา 10 นาที แยกสารสกัดส่วนใสไปวิเคราะห์ โดยปิ เปตต์สารสกัด 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร วางไว้ 2-3 นาที แล้วผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 96 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที ผสมให้เข้ากัน จากนั้นวางที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วดูดสาร 200 ไมโครลิตร ลงในจานหลุม (96 well plate) ทำ 6 ซ้ำ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโน เมตร ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลทแบบหลาย โหมด (Multimode Microplate Reader; Infinite 200 PRO, Tecan Plate Readers, Switzerland)

จากนั้นคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตเทียบกับสารมาตรฐานกลูโคส ความเข้มข้น 0-80 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรและคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต ดังสมการ

$$C = cV / (g \times 1000) \quad (7)$$

โดยที่

C = ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ต่อน้ำหนักแห้งสาหร่าย 1 กรัม)

c = ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่คำนวณได้จากกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

V = ปริมาตรของสารสกัด (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักของสาหร่ายที่นำมาสกัด (กรัม)

2.4.3 การหาปริมาณโปรตีน

การหาปริมาณโปรตีนดัดแปลงจากวิธีโลว์รี (Lowry Method) [12] ซึ่งสาหร่าย 0.02 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองแล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารเป็นเวลา 5 นาที วางไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิ 4-7 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างวางที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath, Vision Scientific Co. LTD, South Korea) เป็นเวลา 60 นาที แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที เพื่อแยกตะกอนตัวอย่างกับสารละลายออกจากกัน เก็บส่วนสารละลายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมด โดยปิเปตต์สารสกัด 200 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Lowry's reagent 2.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เติมสาร Folin-Ciocalteu Reagent 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันทันที พักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นดูดสารตัวอย่าง 200 ไมโครลิตร (ทำ 6 ซ้ำ) ใส่ลงจาน 96 หลุม วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลทแบบหลายโหมด (Multimode Microplate Reader; Infinite 200 PRO, Tecan Plate Readers,

Switzerland) คำนวณปริมาณโปรตีนเทียบกับสารมาตรฐาน Bovine serum albumin (BSA) ความเข้มข้น 0-200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรและคำนวณปริมาณโปรตีน ดังสมการ

$$C = cV / (g \times 1000) \quad (8)$$

โดยที่

C = ปริมาณโปรตีน (ต่อน้ำหนักแห้งสาหร่าย 1 กรัม)

c = ปริมาณโปรตีนที่คำนวณได้จากกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

V = ปริมาตรของสารสกัด (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักของสาหร่ายที่นำมาสกัด (กรัม)

2.4.4 การหาปริมาณฟลาโวนอยด์

การหาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดโดยวิธี Potassium Acetate Colori-metric Method [13] นำสาหร่ายแห้ง 0.02-0.05 กรัม ใส่ลงในหลอดสกัดตัวอย่าง แล้วเติมเมตทีดขนาด 1-2 มิลลิเมตร เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นบ่มไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง แล้วนำเข้าเครื่องทำให้เซลล์แตก (Bead-beater, Biospec Product, USA) ที่ความเร็ว 2,400 รอบต่อนาที นาน 20 วินาที (ซ้ำ 3 ครั้ง) นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนเซลล์ ที่ความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที (Prism R™, Labnet International Inc., USA) [14] เก็บส่วนใสใช้สำหรับวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกต่อไป โดยปิเปตต์สารสกัดสาหร่าย 0.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ (เข้มข้นร้อยละ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร) 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน เติมสารละลายโพแทสเซียมแอสซิเตด (เข้มข้น 1 โมลาร์) 0.1 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 2.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอีกครั้ง วางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Hitachi, U-2900, Japan) คำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์ของตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐานเคอซีตินที่ความเข้มข้น

0-160 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรและคำนวณปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ดังสมการ

$$C = cV / (g \times 1000) \quad (9)$$

โดยที่

C = ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (มิลลิกรัมเคอซีตินต่อกรัม)

c = ความเข้มข้นของเคอซีตินที่เทียบจากกราฟ

มาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

V = ปริมาตรของสารสกัด (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักแห้งของสาหร่าย (กรัม)

2.4.5 การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด [15] โดยปิเปตต์สารสกัดสาหร่าย (ข้อ 2.4.4) 0.2 มิลลิลิตร เติมน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออน 0.6 มิลลิลิตร และเติมสาร Folin-Ciocalteu's Phenol Reagent ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้สารทำปฏิกิริยากัน จากนั้นเติม 8 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้เป็น 3 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ผสมให้เข้ากันอีกครั้ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที วางในที่มืด จากนั้นปิเปตต์สารตัวอย่างดังกล่าวปริมาตร 200 ไมโครลิตร (ทำ 6 ซ้ำ) ลงในจานหลุม วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลทแบบหลายโหมด (Multimode Microplate Reader; Infinite 200 PRO, Tecan Plate Readers, Switzerland) คำนวณหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้น 25-250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และคำนวณปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ดังสมการ

$$C = cV / (g \times 1000) \quad (10)$$

โดยที่

C = ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัม)

c = ความเข้มข้นของกรดแกลลิกที่เทียบจากกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

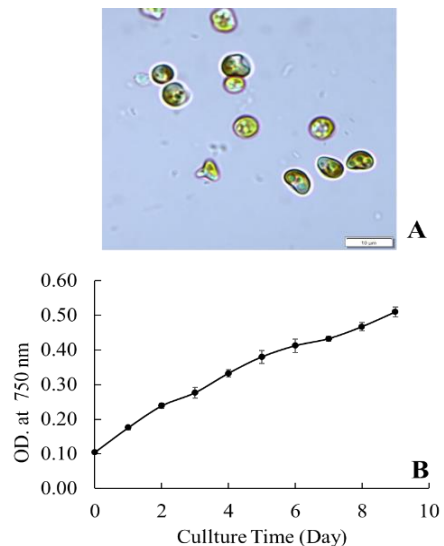
V = ปริมาตรของสารสกัด (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักแห้งของสาหร่าย (กรัม)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

สาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ระยะแบ่งตัวทวีคูณ (Exponential Growth Phase) เป็นหัวข้อสำหรับเพาะเลี้ยงระดับขยายกลางแจ้ง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเมื่อทำการส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ *Tisochrysis* sp. เป็นเซลล์เดี่ยวที่มีลักษณะกลม-รี เซลล์มีสีเหลืองทอง-สีน้ำตาล เส้นผ่านศูนย์กลางยาวประมาณ 4-8 ไมโครเมตร (รูปที่ 2 A)



รูปที่ 2 ลักษณะเซลล์สาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่าของการเพาะเลี้ยงกลางแจ้งวันที่ 9 (A) และค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density, OD) ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร (B) ของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายระยะเวลา 9 วัน

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง (OD₇₅₀) ของสาหร่าย *Tisochrysis* sp. ในถึงระดับขยาย 600 ลิตร บริเวณกลางแจ้ง ระยะเวลา 9 วัน (รูปที่ 2 B) พบว่าค่า OD. เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันเริ่มต้นถึงวันสุดท้ายของการทดลอง แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพของการเพาะเลี้ยงกลางแจ้ง โดยค่า OD. เริ่มต้นที่ประมาณ 0.10 ในวันแรก และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 0.50 ในวันที่ 9 ของการเพาะเลี้ยง และมีค่าอัตราการเติบโตจำเพาะ 0.58 ต่อวัน อัตราการเพิ่มของค่า OD. มีความชันสูงในช่วงวันแรกถึงวันที่ 6 ซึ่งบ่งชี้ว่าเซลล์อยู่ในช่วง Exponential Growth Phase หลังจากนั้นกราฟเริ่มมีความชันลดลงในช่วงวันที่ 6-9 ซึ่งอาจเข้าสู่ระยะ Late Log หรือ Early Stationary Phase เมื่อสารอาหารหรือสภาวะแวดล้อมเริ่มเป็นปัจจัยจำกัด ลักษณะการเจริญดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า pH และความเค็มที่เพิ่มขึ้นตามตารางที่ 1 โดยค่า pH สูงขึ้นจาก 8.54 เป็น 9.33 และความเค็มเพิ่มจาก 15 เป็น 19 ppt ซึ่งสัมพันธ์กับกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงและการระเหยของน้ำในระบบกลางแจ้ง ซึ่งมีอุณหภูมิกลางแจ้งที่ประมาณ 27.5-34.5 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 2) การที่สาหร่าย *Tisochrysis* สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้ความเค็ม 15 ppt ซึ่งต่ำกว่าช่วงความเค็มของน้ำทะเลปกติ (ประมาณ 30-35 ppt) ที่มีรายงานว่าเหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายกลุ่มนี้ [17] ผลดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของสาหร่าย *Tisochrysis* ในการปรับตัวต่อสภาวะแวดล้อม (Physiological Plasticity) ที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะความเค็มที่ลดลง

จากการเพิ่มขึ้นของค่า OD. สะท้อนถึงการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Tisochrysis* sp. อย่าง

ต่อเนื่องในระบบเพาะเลี้ยงขนาด 600 ลิตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tato และ Beiras [16] รายงานว่า *Tisochrysis lutea* มีอัตราการเจริญเติบโตสูงในระบบเปิดเมื่อได้รับแสงเพียงพอและมีการผสมที่ดีต่อเนื่อง นอกจากนี้ Almutairi และคณะ [17] รายงานว่าการเจริญของสาหร่ายขนาดเล็กในช่วง Log Phase ค่า OD. และความหนาแน่นของเซลล์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายใน 5-7 วันแรกของการเพาะเลี้ยง ซึ่งใกล้เคียงกับผลในงานวิจัยนี้ การที่ค่า OD. เริ่มมีแนวโน้มคงที่หลังวันที่ 6 อาจเกิดจากการที่สารอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสเริ่มลดลง รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของค่า pH (>9.0) ที่อาจส่งผลให้การละลายของ CO₂ ที่ได้จากบรรยากาศลดลง ทำให้การสังเคราะห์แสงลดประสิทธิภาพลง [18], [19] ซึ่งสาเหตุให้การเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะชะลอตัว อีกทั้งสภาวะความเค็มที่เพิ่มขึ้น (จาก 15 เป็น 19 ppt) ยังอาจมีผลกระทบต่อสมดุลออสโมซิสของเซลล์ โดยเฉพาะในระบบกลางแจ้งที่มีการระเหยของน้ำอย่างต่อเนื่อง [20], [21] ถึงแม้ *Tisochrysis* sp. จะเป็นสาหร่ายทะเลที่ทนต่อช่วงความเค็มกว้าง แต่การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอาจทำให้การแบ่งเซลล์ลดลงชั่วคราว ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้ OD. เพิ่มขึ้นช้าช่วงท้ายของการทดลอง อย่างไรก็ตามการที่ค่า OD. เพิ่มขึ้นต่อเนื่องตลอด 9 วัน บ่งชี้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเพาะเลี้ยงสาหร่ายนี้กลางแจ้ง และสามารถที่จะเก็บชีวมวลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลผลิตมวลชีวมวลสุดท้าย (24.84 กรัมแห้ง) และผลผลิตเฉลี่ย (Productivity) 0.81 กรัมแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน (ตารางที่ 3) โดยสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงกระบวนการผลิตชีวมวลของสาหร่าย *Tisochrysis* sp. ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 1 ค่าความเค็ม (Salinity) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ระดับขยายขนาด 600 ลิตร กลางแจ้ง ระยะเวลา 9 วัน

Culture Time (Day)	Salinity (ppt)	pH
0	15.0±0.00	8.54±0.07
3	16.0±0.00	9.11±0.10
6	17.5±0.70	9.34±0.12
9	19.5±0.70	9.33±0.10

ตารางที่ 2 อุณหภูมิของอาหารและบรรยากาศ (องศาเซลเซียส) ที่เวลา 9.00 น. และ 16.00 น. ของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ระดับขยายขนาด 600 ลิตร กลางแจ้ง ระยะเวลา 9 วัน

Culture time (Day)	The period of temperature (°C) data collection			
	9.00 AM		4.00 PM	
	media	atmosphere	media	atmosphere
0	24.2±0.2	27.8	27.6±0.2	33.6
1	24.3±0.4	28.0	28.5±0.4	34.1
2	24.2±0.5	28.0	28.5±0.7	33.2
3	23.5±0.2	27.5	28.2±0.9	33.5
4	24.0±0.4	28.0	28.6±1.1	34.5
5	23.5±0.7	27.5	28.5±0.5	33.7
6	23.5±0.2	27.5	28.7±0.4	33.5
7	24.2±0.7	28.0	29.0±0.7	33.5
8	24.0±0.2	27.5	28.5±0.7	34.1
9	24.1±0.2	27.5	28.5±0.8	33.8

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยชีวมวลและผลผลิตของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ระดับขยายขนาด 600 ลิตร กลางแจ้ง ระยะเวลา 9 วัน

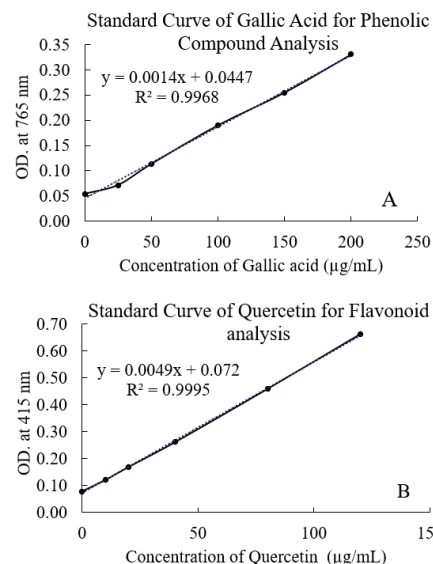
Parameters	<i>Tisochrysis</i> sp.
Specific Growth Rate (per day)	0.58±0.01
Fresh Weight (g FW)	1275±127
Dry Weight (g DW)	24.84±1.13
Biomass per Area (g DW m ⁻²)	7.31±0.33
Productivity (g DW m ⁻² day ⁻¹)	0.81±0.03

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 เพาะเลี้ยงขนาด 600 ลิตร กลางแจ้งระยะเวลา 9 วัน

Parameter	<i>Tisochrysis</i> sp.
Chl <i>a</i> (mg g ⁻¹ DW)	2.47±0.03
Total carotenoid (mg g ⁻¹ DW)	1.90±0.23
Protein (mg g ⁻¹ DW)	11.48±0.95
Carbohydrate (mg g ⁻¹ DW)	127.46±17.41
Phenolic (mg GAE* g ⁻¹ DW)	5.29±0.02
Flavonoid (mg QE** g ⁻¹ DW)	16.66±2.17

* Gallic Acid Equivalent (GAE)

** Quercetin Equivalent (QE)



รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Gallic Acid ที่ความเข้มข้น 0-200 µg mL⁻¹ (A) และกราฟมาตรฐานของสารละลาย Quercetin ที่ความเข้มข้น 0-120 µg mL⁻¹ (B)

องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายขนาดเล็ก *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ที่เพาะเลี้ยงขนาด 600 ลิตร บริเวณกลางแจ้งเป็นเวลา 9 วัน พบว่าสาหร่ายมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ 2.47±0.03 มิลลิกรัมต่อ

กรัมของน้ำหนักแห้ง และแคโรทีนอยด์รวม 1.90 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 4) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคงอยู่ของระบบสังเคราะห์แสงที่มีประสิทธิภาพ และการปรับตัวของเซลล์ต่อสภาวะแสงแดดธรรมชาติภายนอก เนื่องจากภายใต้ความเข้มแสงสูงในระบบกลางแจ้ง สาหร่ายมักลดปริมาณคลอโรฟิลล์และเพิ่มสารป้องกันแสง ซึ่งเป็นกลไก photoacclimation ที่ช่วยให้เซลล์สามารถดำรงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ [21]

สาหร่าย *Tisochrysis* sp. มีปริมาณโปรตีน 11.48 ± 0.95 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และคาร์โบไฮเดรต 127.46 ± 17.41 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีนที่ไม่สูงมากบ่งชี้ว่าสาหร่ายอาจอยู่ในระยะที่มีการจำกัดไนโตรเจน (Nitrogen Limitation) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้เมแทบอลิซึมจากการสังเคราะห์โปรตีนไปสู่การสะสมคาร์โบไฮเดรตหรือลิพิด เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนและคลอโรฟิลล์ เมื่อเกิดการขาดแคลนไนโตรเจน เซลล์สาหร่ายมักลดการสังเคราะห์โปรตีนและเปลี่ยนเส้นทางเมแทบอลิซึมไปสู่การสะสมคาร์โบไฮเดรตหรือไขมันแทน [22], [23] ดังนั้นผลที่ได้จึงสะท้อนถึงการปรับตัวของสาหร่ายต่อสภาวะสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในระบบเพาะเลี้ยงกลางแจ้งที่อาจมีข้อจำกัดด้านสารอาหาร ขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสาหร่ายโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 100–400 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เช่น *Chlorella vulgaris*, *Tisochrysis lutea* และ *Porphyridium* sp. มีคาร์โบไฮเดรตประมาณ 170, 55–150 และ 400–570 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ [24], [25] และสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้ภายใต้สภาวะความเครียด เช่น การจำกัดไนโตรเจน ซึ่งกระตุ้นให้สาหร่ายเปลี่ยนการใช้เมแทบอลิซึมจากการสังเคราะห์โปรตีนไปสู่การสะสมสารสำรองพลังงานประเภทคาร์โบไฮเดรต และการเพิ่มขึ้นของค่า pH ในช่วงปลายการเพาะเลี้ยงสอดคล้องกับการ

เปลี่ยนแปลงดังกล่าว การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนใน *Tisochrysis* อาจเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนในอาหารเลี้ยง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มการสะสมโปรตีนได้อย่างมีนัยสำคัญ [26] รวมถึงการควบคุมความเข้มแสง เช่น การใช้วัสดุบังแสงและการกำหนดระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม โดยเฉพาะในช่วง Exponential Phase ซึ่งเป็นช่วงที่สาหร่ายมีการสังเคราะห์โปรตีนสูง

นอกจากนี้สาหร่าย *Tisochrysis* sp. ยังมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด 5.29 ± 0.02 มิลลิกรัมกรดแกลลิกสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และฟลาโวนอยด์ทั้งหมด 16.66 ± 2.17 มิลลิกรัมเคอเซทินสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) และเคอเซทิน (Quercetin) ตามลำดับ (รูปที่ 3) ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระและการป้องกันความเครียดออกซิเดชัน [15], [27] ขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กชนิดอื่นๆ เช่น สาหร่าย *Tetraselmis* sp. *Nannochloropsis* sp. *Chaetoceros* sp. *Thalassiosira* sp. ที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 19.87 ± 1.50 10.04 ± 0.79 5.86 ± 0.26 และ 2.98 ± 0.2 มิลลิกรัมกรดแกลลิกสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ [28] และ *Tisochrysis lutea* ที่สกัดด้วยน้ำและเมทานอลมีค่าฟีนอลิกทั้งหมด 4.43 ± 0.57 และ 2.32 ± 0.36 มิลลิกรัมกรดแกลลิกสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ [29] สำหรับปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดที่พบในสาหร่าย *Tetraselmis* sp. *Nannochloropsis* sp. *Chaetoceros* sp. *Thalassiosira* sp. มีค่า 37.49 ± 1.53 31.48 ± 0.86 17.82 ± 1.16 8.42 ± 0.78 มิลลิกรัมเคอเซทินสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ [28] อย่างไรก็ตามปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดจากงานวิจัยนี้ซึ่งได้จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระดับกลางแจ้งถือว่าอยู่ในระดับปานกลางและสอดคล้องกับรายงานของสาหร่ายชนิดอื่น ๆ [27], [28], [29]

การที่สาหร่ายสร้างสารต้านอนุมูลอิสระดังกล่าว ในสภาวะเพาะเลี้ยงกลางแจ้งอาจเกิดจากการตอบสนองของสาหร่ายต่อความเข้มแสงและการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระตุ้นให้มีการสังเคราะห์สารทุติยภูมิเพื่อการปกป้องเซลล์ [27] ดังนั้นสาหร่าย *Tisochrysis* sp. ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะกลางแจ้งสามารถสร้างสารเมแทบอไลต์ทั้งขั้นต้นและขั้นทุติยภูมิได้ถึงแม้จะไม่ได้มีปริมาณสูง ซึ่งแสดงถึงศักยภาพในการใช้ประโยชน์เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการประยุกต์ใช้ทางชีวเทคโนโลยีในอนาคต อย่างไรก็ตามสาหร่ายทะเลขนาดเล็กมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดที่แตกต่างกันไปในนั้นขึ้นกับความจำเพาะในชนิดพันธุ์ (Species-specific Differences) สภาวะการเพาะเลี้ยงสารสกัดที่ใช้ในการสกัด วิธีการสกัด [27]

4. สรุป

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ขนาด 600 ลิตร บริเวณกลางแจ้งเป็นระยะเวลา 9 วัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมภายนอกได้ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางชีวเคมีและสารออกฤทธิ์ชีวภาพ ได้แก่ สารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแคโรทีนอยด์ ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระและส่งเสริมสุขภาพคุณสมบัติดังกล่าวสะท้อนถึงศักยภาพของ *Tisochrysis* sp. TISTR 11470 ในการนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งสามารถใช้เป็นอาหารเสริมเพื่อเพิ่มคุณภาพของอาหารและเสริมสร้างภูมิคุ้มกันในสัตว์น้ำ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมชีวเทคโนโลยี เช่น การผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับผลิตภัณฑ์สุขภาพ เครื่องสำอาง หรือเวชภัณฑ์ ถึงแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายนี้อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมภายใต้สภาวะ

เพาะเลี้ยงกลางแจ้ง และสาหร่ายสามารถเจริญได้ที่ความเค็ม 15 ppt มีนัยสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงในระดับขยาย เนื่องจากสามารถลดการพึ่งพาน้ำทะเลหรือเกลือสังเคราะห์ ซึ่งเป็นหนึ่งในต้นทุนหลักของการเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เข้าถึงน้ำทะเลได้จำกัด นอกจากนี้ยังเพิ่มความยืดหยุ่นในการเลือกแหล่งน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยง เช่น น้ำกร่อย หรือการปรับความเค็มจากน้ำจืด ซึ่งอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยรวมได้ อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในระดับกึ่งอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ควรมีการศึกษาปัจจัยแวดล้อมเพิ่มเติม เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ และองค์ประกอบของสารอาหารในน้ำเพาะเลี้ยง เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและการสะสมสารชีวโมเลกุลในสาหร่าย ทั้งนี้การพัฒนาเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมจะเป็นกุญแจสำคัญในการต่อยอดการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายชนิดนี้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านสาหร่าย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่สนับสนุนสถานที่และการดำเนินงานวิจัยทั้งในห้องปฏิบัติการและกลางแจ้ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Ma and Q. Hu, "Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges," *Reviews in Aquaculture*, vol. 16, no. 2, pp. 818-835, 2024.
- [2] M. Rizwan, G. Mujtaba, S. A. Memon, K. Lee, and N. Rashid, "Exploring the potential of microalgae for new

- biotechnology applications and beyond: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 394-404, 2018.
- [3] E. Leal, L. de Beyer, W. O'Connor, M. Dove, P. J. Ralph, and M. Pernice, “Production optimisation of *Tisochrysis lutea* as a live feed for juvenile Sydney rock oysters, *Saccostrea glomerata*, using large-scale photobioreactors,” *Aquaculture*, vol. 533, pp. 736077, 2021.
- [4] C. Mayer, L. Richard, M. Côme, L. Ulmann, H. Nazih, B. Chénais, K. Ouguerram, and V. Mimouni, “The marine microalga, *Tisochrysis lutea*, protects against metabolic disorders associated with metabolic syndrome and obesity,” *Nutrients*, vol. 13, no. 2, pp. 430-447, 2021.
- [5] J. Cichoński and G. Chrzanowski, “Microalgae as a source of valuable phenolic compounds and carotenoids,” *Molecules*, vol. 27, no. 24, pp. 1-21, 2022.
- [6] J. A. M. Prates, “Applications of Bioactive Compounds from Marine Microalgae in Health, Cosmetics, and Functional Foods,” *Applied Sciences*, vol. 15, no.11, pp. 1-26, 2025.
- [7] R. R. L. Guillard and J. H. Ryther, “Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran,” *Canadian journal of microbiology*, vol. 1, no. 8, pp. 229-239, Apr. 1962.
- [8] R. C. Anyanwu, C. Rodriguez, A. Durrant, and A. G. Olabi, “Evaluation of growth rate and biomass productivity of *Scenedesmus quadricauda* and *Chlorella vulgaris* under different LED wavelengths and photoperiods,” *Sustainability*, vol.14, no. 10, pp. 6108-6121, 2022.
- [9] *Technical report*, Use of cultivation data from the algae testbed public private partnership as utilized in NREL's algae state of technology assessments, National Renewable Energy Lab. (NREL), 2016.
- [10] A. Maadane, N. Merghoub, T. Ainane, H. El Arroussi, R. Benhima, S. Amzazi, Y. Bakri, and I. Wahby. “Antioxidant activity of some Moroccan marine microalgae: Pufa profiles, carotenoids and phenolic content,” *Journal of biotechnology*, vol. 215, pp. 13-19, 2015.
- [11] M. DuBois, K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith, “Colorimetric method for determination of sugars and related substances,” *Analytical chemistry*, vol. 28, pp. 350-356, 1956.
- [12] O. Lowry, N. Rosebrough, A. L. Farr, and R. Randall, “Protein measurement with the folin phenol reagent,” *Journal Biology Chemistry*, vol. 193, no. 1, pp. 265–275, 1951.
- [13] S. Aryal, M. K. Baniya, K. Danekhu, P. Kunwar, R. Gurung, and N. Koirala, “Total phenolic content, flavonoid content and antioxidant potential of wild vegetables

- from Western Nepal,” *Plants*, vol. 8, no. 4, pp. 96-105, 2019.
- [14] L. Zhou, X. Duan, K. Li, D. R. A. Hill, G. J. O. Martin, and H. A. R. Suleria, “Extraction and characterization of bioactive compounds from diverse marine microalgae and their potential antioxidant activities,” *Chemistry & Biodiversity*, vol. 20, no. 11, pp. E202300602, 2023.
- [15] S. Chandra, S. Khan, B. Avula, H. Lata, M. H. Yang, M. A. ElSohly, and I. A. Khan, “Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: A comparative study,” *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2014, pp. 1-9, 2014.
- [16] T. Tato and R. Beiras, “The use of the marine microalga *Tisochrysis lutea* (T-iso) in standard toxicity tests; comparative sensitivity with other test species,” *Frontiers in marine science*, vol. 6, pp. 488-498, 2019.
- [17] A. W. Almutairi, A. E. K. B. El-Sayed, and M. M. Reda, “Combined effect of salinity and pH on lipid content and fatty acid composition of *Tisochrysis lutea*,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 27, pp. 3553-3558, 2020.
- [18] J. Masojídek, C. Gómez-Serrano, K. Ranglová, B. Cicchi, Á. E. Bogeat, J. A. C. Manoel, A. S. Zurano, A. M. Silva Benavides, M. Barceló-Villalobos, V. A. R. Carnero, and V. Ördög, “Photosynthesis monitoring in microalgae cultures grown on municipal wastewater as a nutrient source in large-scale outdoor bioreactors,” *Biology*, vol. 11, no. 10, pp. 1380-1398, 2022.
- [19] J. Cvjetinovic, Y. D. Bedoshvili, N. A. Davidovich, E. G. Maksimov, E. S. Prikhozhenko, D. A. Todorenko, D. V. Bodunova, O. I. Davidovich, I. S. Sergeev, and D. A. Gorin, “Exploring salinity induced adaptations in marine diatoms using advanced photonic techniques,” *Scientific Reports*, vol. 14, pp. 32007-32014, 2024.
- [20] J. Scofield, S. Shi, E. L. Prime, S. E. Kentish, G. G. Qiao, and G. J. Martin. “Evaporation reduction and salinity control in microalgae production ponds using chemical monolayers,” *Algal Research*, vol. 66, 2022.
- [21] G. Perin, F. Gambaro, and T. Morosinotto, “Knowledge of regulation of photosynthesis in outdoor microalgae cultures is essential for the optimization of biomass productivity,” *Frontiers in plant science*, vol.13, 2022.
- [22] P. J. Harrison, P. A. Thompson, and G. S. Calderwood, “Effects of nutrient and light limitation on the biochemical composition of phytoplankton,” *Journal of Applied Phycology*, vol. 2, pp. 45-56, 1990.

- [23] M. A. Borowitzka, "Microalgae for aquaculture: opportunities and constraints," *Journal of applied phycology*, vol. 9, no. 5, pp. 393-401, 1997.
- [24] A. Andreeva, E. Budenkova, O. Babich, S. Sukhikh, V. Dolganyuk, P. Michaud, and S. Ivanova, "Influence of carbohydrate additives on the growth rate of microalgae biomass with an increased carbohydrate content," *Marine drugs*, vol. 19, no. 7, pp. 381-409, 2021.
- [25] K. I. Reitan, G. Øie, H. Jørgensen, and X. Wang, "Chemical composition of selected marine microalgae, with emphasis on lipid and carbohydrate production for potential use as feed resources," *Journal of Applied Phycology*, vol. 33, no. 6, pp. 3831-3842, 2021.
- [26] E. W. Becker, "Micro-algae as a source of protein," *Biotechnology advances*, vol. 25, no. 2, pp. 207-210, 2007.
- [27] D. Petrova, L. Yocheva, M. Petrova, Z. Georgieva, Z. Karcheva, T. Toshkova-Yotova, P. Pilarski, and G. Chaneva, "Antimicrobial and antioxidant activities of microalgal extracts," *Oxidation Communication*, vol. 43, no. 1, pp. 103-116, 2020.
- [28] U. T. Ferdous, A. Nurdin, S. Ismail, K. Shaari, and Z. N. B. Yusof, "A comparative study on antioxidant properties, total phenolics, total flavonoid contents, and cytotoxic properties of marine green microalgae and diatoms," *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, vol. 23, no. 1, 2025.
- [29] V. Andriopoulos, M. D. Gkioni, E. Koutra, S. G. Mastropetros, F. N. Lamari, S. Hatziantoniou, and M. Kornaros, "Total phenolic content, biomass composition, and antioxidant activity of selected marine microalgal species with potential as aquaculture feed," *Antioxidants*, vol. 11, no. 7, 2022.

การพัฒนาระบบถามตอบข้อมูลทางธุรกิจด้วยภาษาธรรมชาติ บนพื้นฐานปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด

นพคุณ นันทเสนีย์* และ สุดาสวรรค์ งามมงคลวงศ์

คณะเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสต์บางกอก

298 ซอยสรพาวุธ 27 แขวงบางนาเหนือ เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

รับบทความ 9 มีนาคม 2569 แก้ไขบทความ 21 พฤษภาคม 2569 ตอรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การเข้าถึงข้อมูลทางธุรกิจเพื่อการตัดสินใจอย่างรวดเร็วในปัจจุบันยังคงมีอุปสรรคสำคัญจากทักษะเฉพาะทางด้านภาษา SQL และปัญหาการสร้างข้อมูลเท็จ (Hallucination) ของแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่เมื่อต้องทำงานกับโครงสร้างฐานข้อมูลที่ซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบถามตอบข้อมูลทางธุรกิจด้วยภาษาธรรมชาติ (NL2SQL) และประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิค โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการดึงข้อมูลเสริม (Retrieval-Augmented Generation: RAG) ร่วมกับการให้บริบทโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema Injection) ผ่านโมเดลปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด gpt-oss-120b บนหน่วยประมวลผลความเร็วสูง Groq LPU กระบวนการวิจัยดำเนินการทดสอบเชิงนำร่องผ่านชุดข้อมูลมาตรฐาน Spider 1.0 ในโดเมนห้างสรรพสินค้า จำนวน 25 คำถาม ครอบคลุมระดับความยากตั้งแต่ง่ายถึงยาก ผลการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการป้อนคำถามแบบพื้นฐาน (Zero-shot Baseline) อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล (Execution Accuracy: EX) สูงถึง 96.00% ขณะที่ความถูกต้องของโครงสร้างคำสั่ง (Exact Matching: EM) อยู่ที่ 32.00% ด้านประสิทธิภาพเวลาประมวลผล ระบบมีระยะเวลาตอบสนองเฉลี่ยเพียง 0.73 วินาที ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ (HCI) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 3 วินาที ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการสถาปัตยกรรมฐานข้อมูลร่วมกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด สามารถแก้ปัญหาการหวนข้อมูลและลดความหน่วงในการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ผู้ใช้ทั่วไปและผู้บริหารสามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจทางธุรกิจได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วในระดับการใช้งานจริง

คำสำคัญ: การแปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่งฐานข้อมูล; ปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด; โมเดลภาษาขนาดใหญ่; ความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล

Development of a Business Data Question-Answering System Using Natural Language Based on Generative Artificial Intelligence

Noppakun Nantasane^{*} and Sudasawan Ngammongkolwong

Faculty of Digital Technology and Digital Innovation, Southeast Bangkok University
298 Soi Sanphawut 27, Bang Na Nuea Subdistrict, Bang Na District, Bangkok, 10260

Received 9 March 2026; Revised 21 May 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

Accessing business information for rapid decision-making today remains significantly hampered by specialized SQL language skills and the problem of hallucination in large-scale language models when working with complex database structures. This research aims to develop a natural language-to-database (NL2SQL) business information querying system and evaluate its technical performance by applying Retrieval-Augmented Generation (RAG) techniques combined with schema injection through the gpt-oss-120b generative AI model on a Groq LPU. The research process involved pilot testing using a standard Spider 1.0 dataset in the department store domain, consisting of 25 questions covering difficulty levels from easy to difficult. The results showed that the developed system performed significantly better than the basic query input method (zero-shot baseline), with an execution accuracy of up to 96.00% and an exact matching (EM) accuracy of 32.00%. Processing time efficiency was also assessed. The system has an average response time of only 0.73 seconds, which meets the human-computer interaction (HCI) benchmark of no more than 3 seconds. The results of this research confirm that integrating database architecture with generative artificial intelligence technology can effectively solve data hallucination problems and reduce communication latency, enabling general users and executives to access insightful data to support business decision-making accurately and quickly at a real-world level.

Keywords: NL2SQL; Generative AI; Large Language Models; Execution Accuracy

^{*} *Corresponding Author. Tel.: +669 6456 5993, E-mail Address: noppakun@gmail.com*

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัล องค์การธุรกิจมีการเก็บรวบรวมข้อมูลในปริมาณมหาศาลจากหลายแหล่ง ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลการขาย การผลิต ลูกค้า หรือการเงิน ข้อมูลเหล่านี้ถูกจัดเก็บในระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational Database) ซึ่งมักต้องใช้ภาษาคำสั่งเชิงโครงสร้าง (Structured Query Language: SQL) ในการเข้าถึงและวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การใช้ SQL จำเป็นต้องมีความรู้เฉพาะทาง ส่งผลให้ผู้บริหารและพนักงานทั่วไปที่ไม่มีความเชี่ยวชาญด้านการเขียนโปรแกรม ประสบอุปสรรคในการเข้าถึงข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ [1]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้พยายามแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยการพัฒนา ระบบ Natural Language Interface to Database (NLIDB) เพื่ออำนวยความสะดวกให้พนักงานส่งคำสั่งเป็นภาษาธรรมชาติแทน SQL [2] อย่างไรก็ตาม วิธีการแบบดั้งเดิมมักใช้กฎ (Rule-based) หรือการจับคู่พจนานุกรม (Schema-based Mapping) ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่น และมีความแม่นยำต่ำเมื่อต้องนำไปใช้งานกับโครงสร้างข้อมูลจริงในองค์กรที่มีความซับซ้อน

ความก้าวหน้าของแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Models: LLMs) [3], [4] ได้เปิดโอกาสใหม่ในการแก้ปัญหา โดย Liu et al. [5] ได้สำรวจสถานะปัจจุบันของงานวิจัยการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่งฐานข้อมูล ที่ใช้ LLMs และพบว่าแนวทางดังกล่าวมีศักยภาพสูงในการขับเคลื่อนการพัฒนา ระบบถามตอบฐานข้อมูลรุ่นต่อไป ในทำนองเดียวกัน Hong et al. [6] ได้ทบทวนความท้าทายและแนวโน้มล่าสุดของระบบ Text-to-SQL บนพื้นฐาน LLM โดยชี้ให้เห็นว่าการจัดการโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema Linking) และการลดปรากฏการณ์ Hallucination ยังคงเป็นโจทย์สำคัญที่ต้องแก้ไข

งานวิจัยเชิงประยุกต์ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของแนวทางนี้อย่างชัดเจน Gladkykh และ Kirykov [7] ได้นำเสนอกรอบการทำงาน Daticrs Text2SQL ที่ใช้เทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) ร่วมกับการให้บริบทโครงสร้างฐานข้อมูล และพบว่าแนวทางดังกล่าวสามารถเพิ่มความแม่นยำในการสร้างคำสั่ง SQL ได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ Chen et al. [8] ได้ศึกษาการนำ LLM มาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงธุรกิจระดับองค์กร และพบว่าการให้บริบทฐานข้อมูลที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของผลลัพธ์ในบริบทของประเทศไทย เพ็ญพิชชา คำพิระแบ่ง [9] ได้พัฒนาระบบสร้างชุดคำสั่งสืบค้นฐานข้อมูลด้วยภาษา SQL ผ่าน ChatGPT API โดยอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนการร้องขอข้อมูลจากผู้ที่เกี่ยวข้องในองค์กร งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำโมเดลภาษาขนาดใหญ่มาใช้ในบริบทข้อมูลภาษาไทย และเป็นแรงบันดาลใจสำคัญสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบงานวิจัยด้านการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่งฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วิธีการหลัก	EX (%)
Rajkumar et al. [1]	LLM + Few-shot Prompting	~65
Liu และคณะ (2024) [5]	Schema Linking	85.0
งานวิจัยนี้	RAG + Schema Injection + LPU	96.0

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ใช้ LLM ด้วยวิธีการพื้นฐาน (Few-shot Prompting โดยไม่มีบริบทโครงสร้างฐานข้อมูล) มีค่า EX อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 65 [1] ในขณะที่งานวิจัยนี้ซึ่งนำ

เทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการฝังโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema Injection) อย่างเป็นระบบ และใช้หน่วยประมวลผลเฉพาะทาง LPU สามารถยกระดับค่า EX ได้สูงถึงร้อยละ 96.00 บนชุดข้อมูลมาตรฐาน Spider 1.0 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสถาปัตยกรรมที่พัฒนาขึ้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระดับองค์กร

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางใหม่ผ่านการบูรณาการเทคนิคการดึงข้อมูลเสริม (Retrieval-Augmented Generation) เพื่อแก้ปัญหาความยืดหยุ่น และผลิตผลอย่างเป็นรูปธรรม ควบคู่ไปกับการเลือกใช้สถาปัตยกรรมหน่วยประมวลผลภาษา (Language Processing Unit: LPU) ของ Groq ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลสูงกว่าระบบทั่วไป เพื่อให้ได้ระบบถามตอบที่มีทั้งความแม่นยำ และรวดเร็วในระดับที่ใช้งานจริงได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบ (Prototype) ในการแปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่งฐานข้อมูล และประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับวิธีการพื้นฐาน โดยมีขั้นตอนและระเบียบวิธีวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้ในการพัฒนา

ระบบต้นแบบถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยอาศัยสถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีที่สำคัญ ได้แก่

1. ส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้งาน (Frontend): พัฒนาด้วยเฟรมเวิร์ก Vue.js เพื่อรับคำถามภาษาธรรมชาติจากผู้ใช้
2. ส่วนจัดการตรรกะของระบบ (Backend): พัฒนาด้วย PHP (Yii2 Framework) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการจัดการ Prompt และเชื่อมต่อ API

3. ระบบฐานข้อมูล (Database): ใช้ MySQL ในการจัดเก็บโครงสร้างข้อมูล (Schema) และข้อมูลจำลอง

4. ปัญญาประดิษฐ์ (AI Model): ใช้ Groq API ร่วมกับโมเดลภาษาขนาดใหญ่รุ่น gpt-oss-120b (สถาปัตยกรรม Mixture-of-Experts) ซึ่งประมวลผลผ่านชิป LPU (Language Processing Unit) เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการวิเคราะห์ความหมายและสร้างคำสั่ง SQL

5. สเปกคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

- Apple M3 RAM 8GB

- OS Tahoe 26.3.1

6. เครือข่าย

- Fiber Optic 1000/500 Mbps

7. สภาพแวดล้อมซอฟต์แวร์

- Yii2 2.0.53

- MySQL 8.0

- PHP 8.3.29

- Vue.js 3.5.13

- DBeaver Community Edition 26.04

2.2 การรวบรวมและเตรียมชุดข้อมูลทดสอบ (Dataset Preparation)

การวิจัยนี้ใช้ชุดข้อมูลนำร่อง (Pilot Study) จำนวน 25 คำถาม จากฐานข้อมูลมาตรฐาน Spider 1.0 [10] โดเมนห้างสรรพสินค้าโดยผ่านกระบวนการแปลเป็นภาษาไทยและรักษาความหมายเดิมอย่างเคร่งครัด โดยผ่านการตรวจสอบเพื่อให้มั่นใจว่ายังคงรักษาความหมายและบริบทของคำถามเดิมไว้อย่างครบถ้วน การใช้ชุดคำถามจำนวน 25 ข้อ มีขนาดกลุ่มตัวอย่างที่สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินขั้นนำร่อง (Pilot Study) สำหรับการทดสอบระบบซอฟต์แวร์ต้นแบบ [11] โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบ (Prototype Testing) และพิสูจน์แนวคิด (Proof of Concept: PoC) เบื้องต้นในการนำ

Generative AI มาประยุกต์ใช้แปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่ง SQL แม้จำนวนข้อคำถามดังกล่าวจะยังไม่ครอบคลุมและเพียงพอต่อการนำไปใช้อ้างอิงสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในระดับการผลิต (Production Level) แต่ได้ถูกออกแบบมาให้มีการกระจายระดับความซับซ้อนอย่างรอบด้าน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอด โดยมุ่งเน้นการประเมินจากความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล (Execution Accuracy: EX) ซึ่งถือเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดสำหรับระบบ Text-to-SQL สำหรับการใช้งานจริง ตามแนวทางของ Li et al. [12] เพื่อให้ครอบคลุมการทดสอบอย่างรอบด้านโดยแบ่งเป็น 3 ระดับดังนี้

1. ระดับง่าย (Simple) จำนวน 10 ข้อ: เป็นการสืบค้นข้อมูลจากตารางเดียว (Single Table) ไม่มีการเชื่อมโยงตาราง (No JOIN) อาศัยเพียงเงื่อนไขพื้นฐาน เช่น WHERE, ORDER BY หรือ LIMIT

2. ระดับปานกลาง (Medium) จำนวน 10 ข้อ: เป็นการสืบค้นข้อมูลที่มีการเชื่อมโยง 1-2 ตาราง หรือใช้

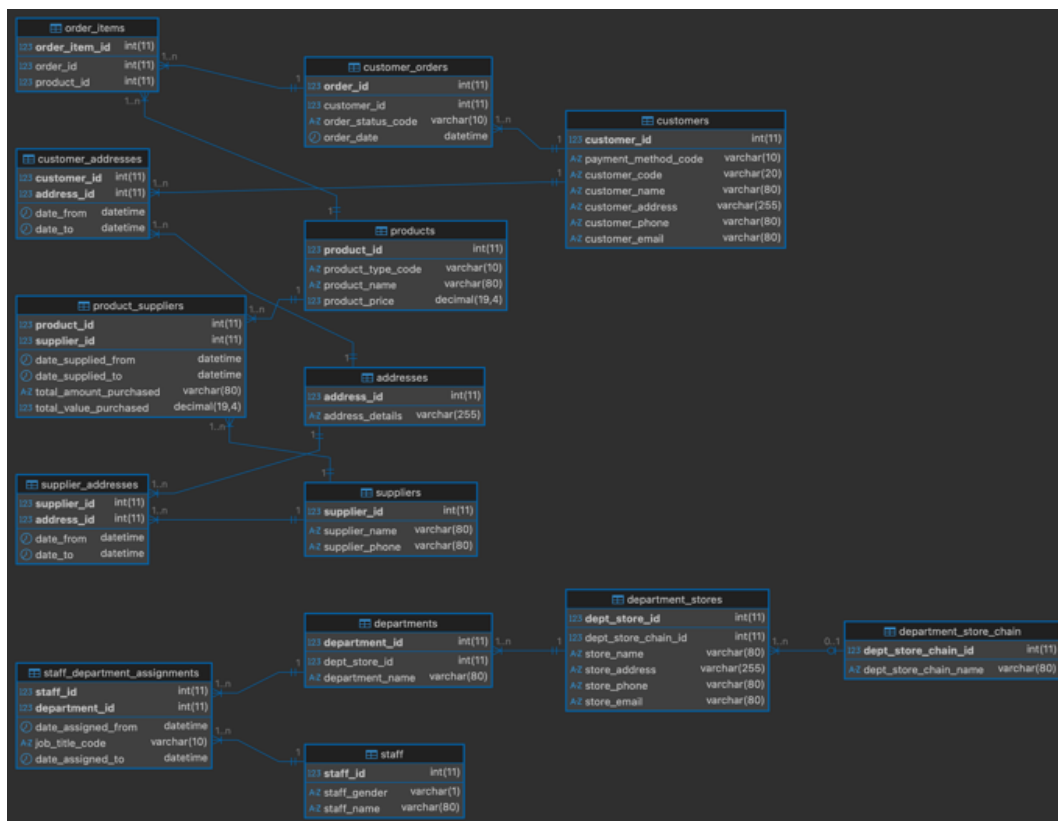
ฟังก์ชันจัดกลุ่มข้อมูล เช่น GROUP BY, HAVING และ Aggregate Functions (COUNT, MAX, MIN)

3. ระดับยาก (Hard) จำนวน 5 ข้อ: เป็นการสืบค้นที่มีความซับซ้อนสูง ต้องเชื่อมโยงมากกว่า 2 ตารางขึ้นไป มีการใช้คำสั่งสืบค้นย่อยซ้อนทับ (Subqueries) หรือใช้ตัวดำเนินการทางเซต (Set Operations) เช่น INTERSECT, EXCEPT

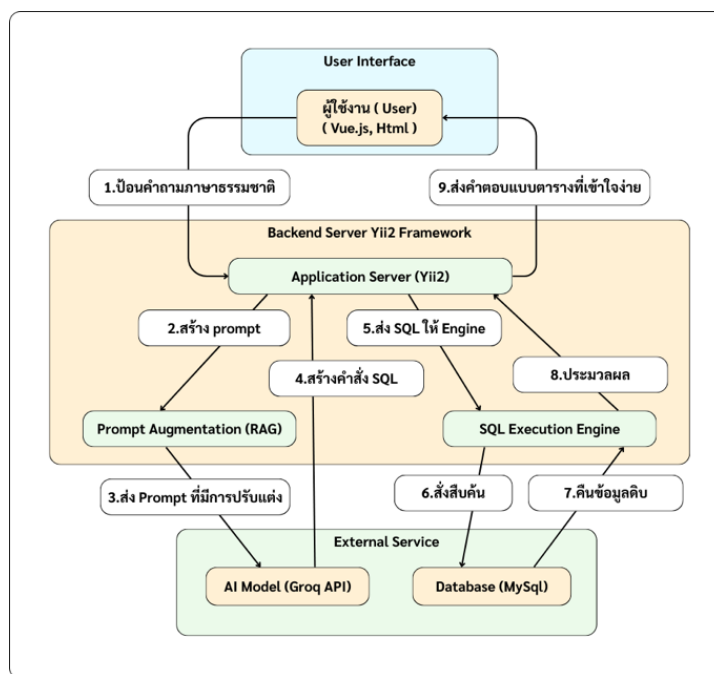
โดยที่โดเมนทางสรรพสินค้าประกอบด้วยข้อมูล 14 ตารางและมีข้อมูลตัวอย่างตารางละ 15 รายการโดยมีรายละเอียดตามรูปที่ 1

2.3 สถาปัตยกรรมและขั้นตอนการทำงานของระบบ (System Process Flow)

กระบวนการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น (Proposed System) อาศัยเทคนิคการปรับแต่งคำสั่ง (Prompt Engineering) เพื่อลดปัญหาการหลอนข้อมูล (Hallucination) ของ AI โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ER-Diagram อธิบายโครงสร้างฐานข้อมูล Department Store



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบ

1. ผู้ใช้งานป้อนคำถามด้วยภาษาธรรมชาติ: ผู้ใช้งาน (User) ได้ตอบกับระบบผ่าน User Interface ซึ่งพัฒนาด้วย Vue.js และ HTML โดยสามารถพิมพ์คำถามทางธุรกิจในรูปแบบภาษาธรรมชาติ

2. ส่งคำถามไปยัง Backend Server: คำถามจากผู้ใช้งานจะถูกส่งไปยัง Application Server (Yii2 Framework) ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการควบคุมกระบวนการทั้งหมดของระบบ

3. การสร้าง Prompt และทำ Prompt Augmentation (RAG): Backend จะนำคำถามของผู้ใช้ไปเข้าสู่กระบวนการ Prompt Augmentation (RAG) โดยดึงข้อมูลโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema), ความหมายของตาราง (Table), คอลัมน์ (Column) และกฎทางธุรกิจ (Business Rules) จากนั้นจะนำข้อมูลเหล่านี้มาประกอบกับคำถามของผู้ใช้ เพื่อสร้าง Prompt ที่มีบริบทครบถ้วนและแม่นยำมากขึ้น เพื่อให้เข้าใจกระบวนการสร้างบริบท (Context-Aware Prompt) อย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างต่อไปนี้แสดง

โครงสร้าง Prompt ที่ระบบสร้างขึ้นจริงก่อนส่งไปยังโมเดล gpt-oss-120b ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนที่ 1 - System Prompt (คำสั่งบทบาท): กำหนดบทบาทและข้อจำกัดของโมเดล เช่น "You are an expert SQL query generator. Your task is to convert Thai natural language questions into valid MySQL SQL queries based on the provided database schema. Return ONLY the SQL query without any explanation or markdown formatting."

ส่วนที่ 2 - Context Injection (การฝังบริบทฐานข้อมูล): ระบบดึงโครงสร้างฐานข้อมูล (Database Schema) ชื่อตาราง ชื่อคอลัมน์ ประเภทข้อมูล และความสัมพันธ์ (Foreign Keys) มาประกอบเป็นบริบทตัวอย่างเช่น

Database Schema:

Table: products

(product_id INT PK,
product_name VARCHAR,

product_type_code VARCHAR,
product_price DECIMAL)

Table: customers

(customer_id INT PK,
customer_name VARCHAR,
customer_address VARCHAR,
payment_method_code VARCHAR)

Table: customer_orders

(order_id INT PK, customer_id INT
FK->customers, order_status_code
VARCHAR, order_date DATE)

ส่วนที่ 3 - User Question (คำถามของผู้ใช้):
คำถามภาษาไทยที่ผู้ใช้งานป้อนเข้ามา เช่น คำถาม:
"ค้นหาชื่อของสินค้าประเภท Hardware ที่มีราคาสูง
ที่สุด" การออกแบบ Prompt ในลักษณะนี้ อาศัย
หลักการของ Prompt Engineering [13] ที่เน้นการให้
บริบทที่ครบถ้วนและชัดเจนแก่โมเดล ส่งผลให้โมเดล
สามารถอ้างอิงชื่อตารางและคอลัมน์ที่ถูกต้องได้โดยตรง
แทนที่จะต้องคาดเดาขึ้นมาเอง ซึ่งเป็นกลไกหลักที่ช่วย
ขจัดปัญหา Hallucination [14]

4. ส่ง Prompt ที่ปรับปรุงแล้วไปยัง AI Model:
Prompt ที่ผ่านการปรับแต่งแล้วจะถูกส่งไปยัง AI
Model (Groq API) ซึ่งทำงานด้วยหน่วยประมวลผล
ความเร็วสูง (LPU) ทำหน้าที่วิเคราะห์ความหมายของ
คำถาม และแปลงเป็นคำสั่ง SQL ที่เหมาะสมกับ
โครงสร้างฐานข้อมูล

5. การสร้างคำสั่ง SQL: AI Model จะส่งผลลัพธ์
กลับมาเป็น SQL จากนั้น Backend (Yii2) จะตรวจสอบ
ความถูกต้องและความปลอดภัยของ SQL ก่อนนำไปใช้
งานจริง

6. ส่งคำสั่ง SQL ไปยัง SQL Execution Engine:
คำสั่ง SQL ที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกส่งไปยัง SQL
Execution Engine เพื่อใช้ประมวลผลกับฐานข้อมูลจริง

7. ดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล: SQL Execution
Engine ติดต่อกับ Database (MySQL) เพื่อดึงข้อมูล
ดิบ (Raw Data) ตามคำสั่ง SQL ที่ได้รับ

8. ประมวลผลและจัดรูปแบบผลลัพธ์: ข้อมูลที่
ได้จากฐานข้อมูลจะถูกส่งกลับมายัง Backend แปลง
ผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปแบบของตาราง Html

9. ส่งคำตอบกลับไปแสดงผลแก่ผู้ใช้งาน

2.4 การกำหนดตัวเปรียบเทียบฐานและ การประเมินผล (Baseline Setup and Evaluation)

เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบ
ที่พัฒนาขึ้นได้อย่างเป็นรูปธรรม ผู้วิจัยได้กำหนด ตัว
เปรียบเทียบฐาน (Baseline) โดยใช้วิธีการ Zero-shot
Prompting ซึ่งเป็นการป้อนคำถามภาษาธรรมชาติ
ให้แก่แบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ ประมวลผลและสร้าง
คำสั่ง SQL ในทันที โดยปราศจากการให้ข้อมูลตัวอย่าง
(Examples) และไม่มีการแนบข้อมูลบริบทโครงสร้าง
ฐานข้อมูล (Database Schema) ล่วงหน้า ไม่ว่าจะเป็น
ชื่อตาราง (Tables) ชื่อคอลัมน์ (Columns) หรือ
ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (Relationships) วิธีการนี้
เป็นการพึ่งพาความรู้พื้นฐานที่โมเดลเคยถูกฝึกสอนมา
เท่านั้น ซึ่งมักบีบบังคับให้โมเดลต้อง "คาดเดา"
โครงสร้างข้อมูลเป้าหมายเอาเอง และเป็นสาเหตุหลักที่
นำไปสู่ปรากฏการณ์หลอนข้อมูล (Hallucination) ทำให้
คำสั่ง SQL ที่สร้างขึ้นไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้
เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่พัฒนาขึ้น โดยมีเกณฑ์
การประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิค 3 ด้าน ดังนี้

1. ความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล (Execution
Accuracy: EX): ตรวจสอบว่าผลลัพธ์ (Data Table) ที่
ได้จากการรัน Generated SQL ตรงกับผลลัพธ์ที่ได้จาก
การรันเฉลยมาตรฐาน (Gold Standard SQL) หรือไม่
ถือเป็นตัวชี้วัดหลักของการวิจัยนี้

2. ความถูกต้องของโครงสร้างคำสั่ง (Exact Matching: EM): ตรวจสอบความเหมือนของโครงสร้างตัวอักษรและไวยากรณ์ระหว่างคำสั่งที่ AI สร้างขึ้นกับคำสั่งเฉลย

3. ประสิทธิภาพด้านเวลา (Average Response Time): วัดระยะเวลาเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มส่งคำถามจนถึงได้รับคำตอบกลับมาจาก API (Inference Time)

ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานเบื้องต้น (Heuristic Criteria) สำหรับชี้วัดความสำเร็จของระบบต้นแบบ คือ ค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล (EX) ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80.00 และใช้เวลาตอบสนองเฉลี่ย (Response Time) ไม่เกิน 3 วินาที

2.5 เกณฑ์การประเมินและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยการคำนวณค่าสถิติเชิงพรรณนาเพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านความถูกต้องของผลลัพธ์ และด้านประสิทธิภาพด้านเวลา ทั้งนี้ ได้กำหนดเกณฑ์ชี้วัดประสิทธิภาพ (Evaluation Metrics) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของระบบสำหรับการใช้งานจริง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 ด้านความถูกต้อง (Accuracy)

วิเคราะห์โดยใช้ค่าร้อยละ (Percentage) การประเมินด้านความถูกต้องวิเคราะห์โดยใช้ค่าร้อยละ (Percentage) ของความถูกต้องโดยพิจารณาใน 2 มิติ ได้แก่ Exact Matching Accuracy (EM) และ Execution Accuracy (EX)

Exact Matching Accuracy (EM) หมายถึง การเปรียบเทียบคำสั่ง SQL ที่ระบบสร้างขึ้นกับชุดคำสั่งเฉลย (Gold SQL) แบบตัวอักษรต่อตัวอักษร หรือเทียบเชิงโครงสร้างไวยากรณ์ (Syntax)

โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนดังนี้

1 = SQL ทั้งสองชุดมีโครงสร้างส่วนประกอบเหมือนกันทุกประการ (ไม่นับรวมการเว้นวรรค)

0 = มีการใช้ฟังก์ชันต่างกันหรือเขียนสลับตำแหน่งในลักษณะที่ส่งผลต่อรูปประโยค

Execution Accuracy (EX) หมายถึง ความถูกต้องของผลลัพธ์ (Execution Result) ที่ได้จากการรันคำสั่ง SQL โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากคำสั่ง SQL มาตรฐาน (Gold Standard SQL) โดยไม่สนใจว่าวิธีการเขียน SQL จะแตกต่างกันอย่างไร โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนดังนี้

1 = ผลลัพธ์ตรงกับ Gold Standard ทุกประการ

0 = ผลลัพธ์ไม่ตรงกับ Gold Standard

ค่าความถูกต้องโดยรวมของระบบคำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{\text{จำนวนคำตอบที่ถูกต้อง}}{25} \times 100$$

Evaluation Metrics ด้าน Accuracy (เกณฑ์อ้างอิง)

- Accuracy $\geq$ 80% ถือว่าระบบมีความถูกต้อง อยู่ในระดับดีและเหมาะสมต่อการใช้งานเชิงธุรกิจ

- Accuracy $<$ 80% ถือว่ายังต้องมีการปรับปรุง ประสิทธิภาพของระบบ

2.5.2 ด้านประสิทธิภาพเวลา (Time Efficiency)

การประเมินประสิทธิภาพด้านเวลาใช้ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการตอบสนองของระบบ (Average Response Time) โดยวัดตั้งแต่ผู้ใช้งานส่งคำถามเข้าสู่ระบบจนกระทั่งระบบแสดงผลลัพธ์สุดท้ายจากชุดคำถามทดสอบจำนวน 25 ข้อ

สูตรการคำนวณ

$$\text{Average Response Time} = \frac{\sum_{i=1}^{25} (T_i)}{25}$$

Evaluation Metrics ด้าน Response Time (เกณฑ์อ้างอิง)

Average Response Time ≤ 3 วินาที ถือว่าระบบมีประสิทธิภาพด้านการตอบสนองในระดับที่เหมาะสมสำหรับระบบถามตอบเชิงโต้ตอบ

Average Response Time > 3 วินาที ถือว่าระบบมีความล่าช้าและควรได้รับการปรับปรุง

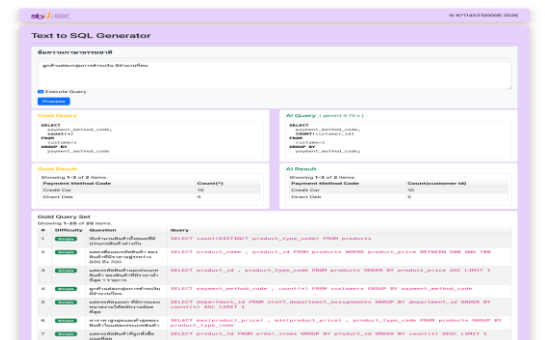
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

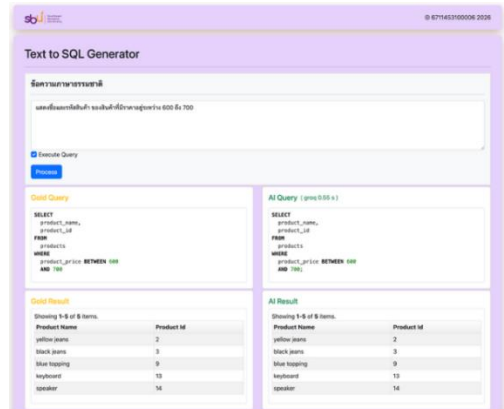
จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น เทียบกับระบบพื้นฐาน (Zero-shot Baseline) และจำแนกตามระดับความยากของคำถาม ได้ผลการวิจัยดังนี้

3.1.1 ระบบต้นแบบถูกออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) ให้รวบรวมฟังก์ชันหลักไว้ในหน้าจอเดียว

ระบบประกอบด้วยส่วนการทำงาน การแสดงผล และส่วนของ Query Set อ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 หน้าจอหลักการทำงานและการแสดงผล

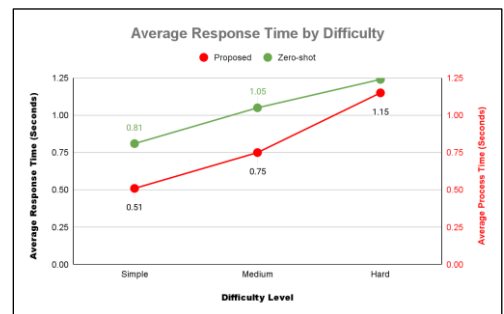


รูปที่ 4 หน้าจอแสดงตารางข้อมูลที่ดึงจาก Database โดยใช้ SQL จาก Gold Query เพื่อใช้เปรียบเทียบความถูกต้องของผลลัพธ์ระหว่าง Gold Query กับ AI Query

3.1.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบพื้นฐาน (Baseline Comparison)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาเปรียบเทียบ Zero-shot

ระดับความยาก (Difficulty Level)	จำนวนคำถาม (ข้อ)	เวลาเฉลี่ยการประมวลผล (วินาที/ข้อ)	
		Proposed	Zero-shot
Simple	10	0.51	0.81
Medium	10	0.75	1.05
Hard	5	1.15	1.24
Overall	25	0.73	2.48



รูปที่ 5 กราฟเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลแยกตามระดับความยาก (Average Response Time by Difficulty)

3.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาและความถูกต้องของระบบ

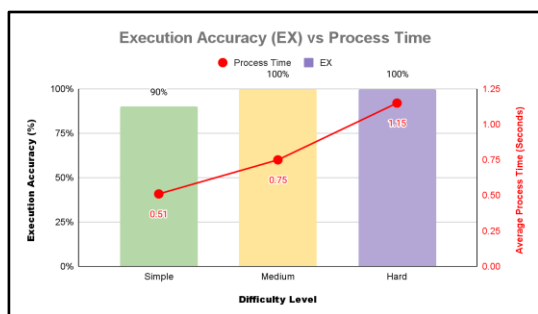
ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาและความถูกต้องของผลลัพธ์ระหว่างระบบที่มีการให้ข้อมูล Schema และไม่มี Schema

ระบบ ที่ทดสอบ	Schema	ความถูกต้องของผลลัพธ์ (EX) %	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
Zero-shot	NO	0%	2.48
Proposed	YES	96%	0.73

ผลการทดสอบจากตารางที่ 3 พบประเด็นสำคัญดังนี้

1. ด้านเวลาประมวลผล (Time Efficiency) ระบบใช้เวลาเฉลี่ย 0.73 วินาที (ระดับง่าย 0.51 วินาที, ปานกลาง 0.75 วินาที, และยาก 1.15 วินาที) ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ประสิทธิภาพที่กำหนด (≤ 3 วินาที)

2. ด้านความถูกต้อง (Accuracy): ระบบบรรลุค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ (EX) เฉลี่ยสูงถึง 96% (ระดับ Simple 90%, Medium 100%, Hard 100%) ในขณะที่ค่า Exact Matching (EM) อยู่ที่ 32.00%



รูปที่ 6 ความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูลแยกตามระดับความยาก (Execution Accuracy (EX) vs Process Time)

3.2 การอภิปรายผล

จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบถามตอบข้อมูลทางธุรกิจที่พัฒนาขึ้น สามารถอภิปรายประเด็นสำคัญที่ค้นพบเชื่อมโยงกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

3.2.1 ประสิทธิภาพของเทคนิค RAG และ Schema Injection ในการลดปัญหาการหลอนข้อมูล

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่า Execution Accuracy (EX) สูงถึง 96.00% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประมวลผลแบบพื้นฐาน (Zero-shot Baseline) ที่มีค่า EX อยู่ที่ 0.00% อย่างสิ้นเชิง ความสำเร็จนี้เป็นผลจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการดึงข้อมูลเสริม (Retrieval-Augmented Generation: RAG) ร่วมกับการฝังบริบทโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema Injection) [14] ที่ระบุว่าการเสริมบริบทข้อมูลเฉพาะทาง (Knowledge-intensive tasks) ช่วยให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่สามารถดึงข้อมูลและประมวลผลคำตอบได้แม่นยำขึ้น โดยการทำ Schema Injection ทำหน้าที่เป็นกรอบกำหนดตรรกะ (Logical Constraints) ให้แก่ AI ทำให้สามารถระบุข้อผิดพลาดและคัดค้านได้ถูกต้องตามความเป็นจริง ลดปัญหาการหลอนข้อมูล (Hallucination) ที่มักเกิดขึ้นในโมเดลแบบ Zero-shot ซึ่งขาดการรับรู้ถึงโครงสร้างฐานข้อมูลจริง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อป้อนคำถามภาษาธรรมชาติว่า “หาชื่อและรหัสลูกค้า ที่มีที่อยู่ประกอบด้วยคำว่า ‘TN’ ” ในกรณีที่ระบบทำงานร่วมกับเทคนิคการฝังบริบทโครงสร้างฐานข้อมูล (Schema Injection) จะสามารถสร้างคำสั่ง SQL ได้อย่างถูกต้องตรงตามโครงสร้างจริง คือ

```
SELECT customer_name,  
customer_code  
FROM customers  
WHERE customer_address LIKE '%TN%';
```

แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อระบบทำงานแบบพื้นฐาน (Zero-shot Baseline) ผลลัพธ์คำสั่ง SQL ที่ได้กลับเป็น

```
SELECT c.name,
c.id
FROM customers c
JOIN customer_addresses a
ON a.customer_id = c.id
WHERE a.address LIKE '%TN%';
```

ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า หากปราศจากการให้ข้อมูลบริบทโครงสร้างฐานข้อมูลล่วงหน้า ระบบจะเกิดปรากฏการณ์หลอนข้อมูล (Hallucination) โดยการคาดเดาชื่อตาราง (Table) และชื่อคอลัมน์ (Column) ขึ้นมาเอง ซึ่งไม่มีอยู่จริงในระบบฐานข้อมูล ส่งผลให้คำสั่งดังกล่าวไม่สามารถนำไปประมวลผลผลลัพธ์ (Execution Failure) ได้

3.2.2 ความแตกต่างระหว่างความถูกต้องของผลลัพธ์ (EX) และไวยากรณ์คำสั่ง (EM)

ประเด็นที่น่าสนใจคือค่าความถูกต้องของไวยากรณ์คำสั่ง (Exact Matching: EM) ที่มีเพียง 32.00% แม้ค่า EX จะสูงถึง 96.00% ก็ตาม ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการประเมินเชิงความหมาย (Semantic Evaluation) ตามแนวทางของ Li et al. [12] และ Zhong et al. [15] เนื่องจากภาษา SQL มีคุณสมบัติเป็นภาษาเชิงประกาศ (Declarative Language) ที่สามารถเขียนได้หลายรูปแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ข้อมูลเดียวกัน (Semantic Equivalence) เช่น การเลือกใช้คำสั่ง JOIN ที่แตกต่างกันหรือการจัดลำดับเงื่อนไขใน WHERE Clause การที่ระบบให้ค่า EX สูงชี้ให้เห็นว่าปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิดมีความสามารถในการตีความความหมาย (Intent Parsing) ได้อย่างถูกต้องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการ

ทางธุรกิจ แม้รูปแบบการเขียนคำสั่งจะไม่ตรงกับชุดข้อมูลเฉลยทุกตัวอักษรก็ตาม

3.2.3 การตอบสนองที่ฉับไวภายใต้ทฤษฎีปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ (HCI)

ระยะเวลาการตอบสนองเฉลี่ยที่ 0.73 วินาทีต่อคำถาม ถือเป็นประสิทธิภาพที่โดดเด่นอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 3 วินาที ผลลัพธ์นี้มีความสำคัญในเชิงการนำไปใช้งานจริงตามทฤษฎีขีดจำกัดของเวลาในการตอบสนองของ Nielsen [16] ซึ่งระบุว่า การตอบสนองที่อยู่ในช่วง 1.0 วินาที จะช่วยรักษา "กระบวนการคิด (Flow of thought)" ของผู้ใช้งานให้มีความต่อเนื่องและไม่รู้สึกว่าการขัดจังหวะความเร็วระดับนี้เกิดขึ้นจากการใช้สถาปัตยกรรมแบบ Mixture-of-Experts (MoE) ของโมเดล gpt-oss-120b ร่วมกับการประมวลผลผ่านหน่วยประมวลผล Groq LPU ที่ถูกออกแบบมาเพื่อลดความหน่วง (Latency) ในการสร้างโทเค็นโดยเฉพาะ ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ระบบมีความพร้อมสำหรับการใช้งานในระดับองค์กรที่ต้องการผลลัพธ์แบบเรียลไทม์

3.2.4 การวิเคราะห์ข้อผิดพลาดและแนวทางปรับปรุงในบริบทภาษาไทย

จากการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดพบว่าความคลุมเครือของคำศัพท์ภาษาไทยเป็นอุปสรรคสำคัญ เช่น คำว่า "ปริมาณ" ซึ่งระบบอาจตีความได้ทั้ง จำนวน ระเบียบ หรือ ผลรวมยอดเงินการค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่า ลำพังเพียงเทคนิค NL2SQL อาจยังไม่เพียงพอสำหรับการจัดการความกำกวมของภาษามนุษย์ในบางกรณี สอดคล้องกับข้อเสนอแนะที่ว่าในทางปฏิบัติควรมีการกำหนดกฎทางธุรกิจเพิ่มเติมในขั้นตอนการทำ Prompt Engineering เพื่อให้ระบบสอบถามความต้องการที่ชัดเจนจากผู้ใช้งานก่อนประมวลผลคำสั่ง เพื่อลดโอกาสการ

แสดงผลข้อมูลที่ผิดพลาดจากความเข้าใจภาษาที่คลาดเคลื่อน

4. สรุป

การวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบแปลงภาษาธรรมชาติเป็นคำสั่งฐานข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงบนพื้นฐานโมเดลปัญญาประดิษฐ์เชิงกำเนิด gpt-oss-120b ผ่านหน่วยประมวลผล Groq LPU โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำคะแนนความถูกต้องของผลลัพธ์ข้อมูล (Execution Accuracy: EX) เฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 96.00 และใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ยเพียง 0.73 วินาที ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (≤ 3 วินาที) ในทุกระดับความยาก

ค่า Exact Matching (EM) ที่อยู่ในระดับต่ำ (ร้อยละ 32.00) นั้น ไม่ได้สะท้อนถึงความบกพร่องของระบบ แต่เป็นผลจากคุณสมบัติของภาษา SQL ที่เป็นภาษาเชิงประกาศ (Declarative Language) ซึ่งสามารถเขียนโครงสร้างคำสั่งได้หลากหลายรูปแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เดียวกัน (Semantic Equivalence) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ BIRD Benchmark [12] และงานวิจัยด้านการประเมินเชิงความหมาย [15] ที่ชี้ว่าการใช้งาน NL2SQL จริงควรให้ความสำคัญกับ EX เป็นหลัก

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นตัวเลขที่น่าสนใจคือระบบทำคะแนน EX ได้สมบูรณ์ 100% ในระดับ Medium และ Hard แต่ได้เพียง 90% ในระดับ Simple ซึ่งขัดกับสัญชาตญาณที่คาดว่าคำถามง่ายน่าจะให้ผลแม่นยำกว่า เมื่อวิเคราะห์กรณีผิดพลาดพบว่าต้นเหตุคือความคลุมเครือเชิงความหมายของภาษาไทย กล่าวคือ คำถามที่ระบุว่า "สินค้าที่ถูกสั่งซื้อในปริมาณมากที่สุด" นั้น มีคำสำคัญ "ปริมาณ" ที่โมเดลต้องตีความว่าหมายถึงปริมาณสะสม (Cumulative Quantity) ในตาราง product_suppliers หรือจำนวนครั้งที่ปรากฏในตาราง order_items ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับปรุงในอนาคตควรเน้นที่การเพิ่ม Business

Glossary หรือคำอธิบายความหมายของคอลัมน์ (Column Description) เข้าไปใน Prompt เพื่อช่วยให้โมเดลแก้ไขความคลุมเครือทางความหมายได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการนำผลไปใช้อ้างอิง ประการแรก ชุดคำถามทดสอบจำนวน 25 ข้อในโดเมนห้างสรรพสินค้าเพียงโดเมนเดียว เป็นการทดสอบในระดับนำร่อง (Pilot Study) เพื่อพิสูจน์แนวคิด (Proof of Concept) เท่านั้น ยังไม่สามารถอ้างอิงแทนการประเมินในระดับการผลิต (Production Level) ที่ต้องการชุดข้อมูลขนาดใหญ่และหลากหลายโดเมนได้ เช่น ชุดข้อมูล BIRD Benchmark [12] ที่ครอบคลุมกว่า 11,000 คำถามใน 37 โดเมน ประการที่สอง ระบบได้รับการทดสอบกับคำถามภาษาไทยเป็นหลัก ซึ่งอาจมีความท้าทายเพิ่มเติมในการรองรับภาษาอื่น ๆ หรือสำเนียงภาษาไทยถิ่น ประการที่สาม เกณฑ์ KPI ที่กำหนด ($EX \geq 80\%$ และเวลา ≤ 3 วินาที) เป็นเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้นสำหรับระบบต้นแบบ มิใช่มาตรฐานอุตสาหกรรมระดับสากล ดังนั้นในการขยายผลสู่การใช้งานจริงในองค์กร ควรมีการกำหนดเกณฑ์ประเมินที่สอดคล้องกับบริบทและความต้องการเฉพาะขององค์กรนั้น ๆ

นอกจากนี้ การใช้สถาปัตยกรรม Mixture-of-Experts ร่วมกับชิป LPU ของ Groq ประกอบกับเทคนิค Prompt Engineering [13] และการให้บริบท Database Schema อย่างเป็นระบบ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ระบบสามารถสร้างคำสั่ง SQL ที่ซับซ้อนได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว [17]

สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต องค์กรสามารถต่อยอดระบบนี้สู่การวิเคราะห์เชิงแนะนำ (Prescriptive Analytics) โดยให้ AI สืบหาต้นตอของปัญหาจากฐานข้อมูลและให้คำแนะนำเชิงธุรกิจ (Actionable Recommendations) รวมถึงพัฒนาให้ระบบสร้างแดชบอร์ดสรุปผลอัตโนมัติ (Automated

Dashboard Generation) ผ่านการทำงานร่วมกับไลบรารี Data Visualization เพื่อแปลงผลลัพธ์ SQL เป็นภาพที่ผู้บริหารเข้าใจได้รวดเร็วขึ้น ในด้านงานวิจัยควรศึกษาการนำโมเดลภาษาขนาดใหญ่มาประมวลผลบนเซิร์ฟเวอร์ขององค์กรเอง (On-Premise LLMs) เพื่อป้องกันการรั่วไหลของข้อมูลธุรกิจ และออกแบบระบบให้รองรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพข้ามโมเดล (Multi-Model Benchmarking) เช่น Groq, Gemini หรือ GPT-4 เพื่อหาแนวทางที่มีความคุ้มค่าสูงสุดในการนำไปใช้งานจริงในระดับองค์กร

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดาสวรรค์ งามมงคลวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณคณาจารย์หลักสูตร MSIT คณะเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเซาท์อีสต์บางกอก ที่ถ่ายทอดองค์ความรู้ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่สละเวลาประเมินและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Rajkumar, R. Li, and D. Bahdanau, "Evaluating the text-to-SQL capabilities of large language models," *arXiv Computation and Language*, arXiv:2204.00498, 2022.
- [2] F. Li and H. V. Jagadish, "Constructing an interactive natural language interface for relational databases," in *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 8, no. 1, pp. 73-84, 2014.
- [3] T. B. Brown et al., "Language models are few-shot learners," *arXiv Computation and Language*, arXiv:2005.14165, 2020.
- [4] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, Ł. Kaiser, and I. Polosukhin, "Attention is all you need," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, 2017.
- [5] X. Liu et al., "A survey of NL2SQL with large language models: Where are we, and where are we going?," *arXiv preprint arXiv:2408.05109*, 2024.
- [6] Z. Hong, Z. Yuan, Q. Zhang, H. Chen, J. Dong, F. Huang, and H. Huang, "Next-generation database interfaces: A survey of LLM-based text-to-SQL," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 37, no. 12, pp. 7328-7345, 2025.
- [7] T. Gladkykh and K. Kirykov, "Datrics Text2SQL: A framework for natural language to SQL query generation," *arXiv Databases*, arXiv:2506.12234, 2025.
- [8] A. Chen et al., "Text-to-SQL for enterprise data analytics," *arXiv preprint arXiv:2507.14372*, 2025.
- [9] P. Khampirapang, "Automatic SQL Database Query Generation Using ChatGPT API," M.S. thesis, Dept. Comput. Eng., Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2024.
- [10] T. Yu et al., "Spider: A large-scale human-labeled dataset for complex and cross-domain semantic parsing and text-to-SQL

- task,” *arXiv Computation and Language*, arXiv:1809.08887, 2018.
- [11] M. A. Hertzog, “Considerations in determining sample size for pilot studies,” *Research in Nursing & Health*, vol. 31, no. 2, pp. 180–191, 2008.
- [12] J. Li et al., “Can LLM already serve as a database interface? a big bench for large-scale database grounded text-to-sqls,” *arXiv Computation and Language*, arXiv:2305.03111, 2023.
- [13] V. Liu and L. B. Chilton, “Design guidelines for prompt engineering text-to-image generative models,” in *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2022, pp. 1–14.
- [14] P. Lewis and E. Perez, “Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks,” in *Proceedings of 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020)*, Vancouver, Canada, 2020.
- [15] R. Zhong, T. Yu, and D. Klein, “Semantic evaluation for text-to-SQL with distilled test suites,” in *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2020, pp. 396–411.
- [16] J. Nielsen, *Usability Engineering*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1994.
- [17] K. T. Pham, T. H. Nguyen, J. Jo, Q. V. H. Nguyen, and T. T. Nguyen, “Multilingual text-to-SQL: Benchmarking the limits of language models with collaborative language agents,” *arXiv Computation and Language*, arXiv:2509.24405, 2025.

ผลของการเติมผงผักเคลต่อคุณภาพด้านสี ความแข็ง และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของวุ้น

วีระศักดิ์ ศรีลารัตน์ พชรลักษณ์ วัฒนไชย สุชัยญา ปิ่นสวัสดิ์ รัตนารณณ์ พุทธพรทิพย์ และ สินีนาถ สุขทนารักษ์*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
เลขที่ 1 หมู่ที่ 20 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

รับบทความ 24 ธันวาคม 2568 แก้ไขบทความ 5 มิถุนายน 2569 ตอบรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคล โดยศึกษาปริมาณผงผักเคลที่เสริมลงไปในการผลิตวุ้นทั้งหมด 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (สูตร Control), ร้อยละ 0.5, ร้อยละ 1 และร้อยละ 1.5 ผลการทดลองพบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์วุ้นสูตร Control มากที่สุด ซึ่งสูตร Control มีคะแนนชอบด้านลักษณะปรากฏอยู่ที่ 7.93 ± 1.52 ด้านสีอยู่ที่ 7.56 ± 1.44 ด้านกลิ่นอยู่ที่ 7.26 ± 1.05 ด้านรสชาติอยู่ที่ 7.30 ± 1.64 ด้านเนื้อสัมผัสอยู่ที่ 7.26 ± 1.48 และด้านความชอบโดยรวมอยู่ที่ 7.06 ± 1.92 แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลสูตร Control ไม่มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลร้อยละ 0.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์วุ้นสามารถเสริมผงผักเคลได้ถึงร้อยละ 0.5 ผู้ทดสอบชิมก็ยังให้การยอมรับทางประสาทสัมผัส เมื่อพิจารณาผลการทดลองค่าสี (L^* , a^* , และ b^*) พบว่า ผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลทั้ง 4 ระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผงผักเคลมีลักษณะเป็นผงสีเขียว ยิ่งใส่ผงผักเคลลงไป ผลิตภัณฑ์วุ้นจะมีสีเขียวเข้มขึ้น ส่วนค่าเนื้อสัมผัส (Hardness) พบว่า ผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลสูตร Control มีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลที่ร้อยละ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มผงผักเคลมากขึ้น ผลิตภัณฑ์วุ้นมีค่าความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าผงผักเคลอาจไปขัดขวางการเชื่อมต่อของโครงสร้างวุ้นนั่นเอง

คำสำคัญ : ผักเคล; ผงผัก; วุ้น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 4397 3551, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: sineenart@vru.ac.th

The Effect of Kale Powder Fortification on Color, Hardness and Sensory Acceptability of Jelly

Weerasak Seelarat Patcharalak Watanachai Suchanya Pinsawat

Rattanaporn Puttapornthip and Sineenart Suktanarak*

Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage
No. 1, Village No.20, Khlong Nueng Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani Province, 13180

Received 24 December 2025; Revised 5 June 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

This research aimed to develop a jelly product supplemented with kale powder. The study investigated four levels of kale powder added to the jelly product: 0% (Control), 0.5%, 1%, and 1.5%. The results showed that the panelists gave the highest acceptance scores to the control formula. The Control formula obtained liking scores of 7.93 ± 1.52 for appearance, 7.56 ± 1.44 for color, 7.26 ± 1.05 for aroma, 7.30 ± 1.64 for taste, 7.26 ± 1.48 for texture, and 7.06 ± 1.92 for overall acceptance. However, since there was no statistically significant difference ($p > 0.05$) between the control formula and the jelly product supplemented with 0.5% kale powder in terms of appearance, color, odor, taste, texture, and overall liking. Therefore, it can be concluded that the jelly product can be supplemented with up to 0.5% kale powder while still maintaining sensory acceptance from the panelists. When considering the results of the color values (L^* , a^* and b^*), it was found that the jelly products supplemented with all four levels of kale powder were statistically significantly different ($p \leq 0.05$) due to the green color of kale powder. As the amount of kale powder increased the jelly product became darker green. Regarding texture (hardness), it was found that the control formula of the kale powder-supplemented jelly product was significantly different from the 5% kale powder-supplemented product ($p < 0.05$). As the concentration of kale powder increased, the hardness of the jelly product markedly decreased. This might be because kale powder interfering with gel network structural of the jelly.

Keywords : Kale; Vegetable powder; Jelly

* Corresponding Author. Tel.: +666 4397 3551, E-mail Address: sineenart@vru.ac.th

1. บทนำ

วุ้นเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานชนิดหนึ่งที่อยู่กับคนไทยมาช้านาน นิยมซื้อเป็นของฝากหรือรับประทานเป็นอาหารว่าง เนื่องจากวุ้นเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความหอมหวาน หาสีรับประทานได้ทั่วไป โดยเนื้อสัมผัสของวุ้นจะมีลักษณะคล้ายกับขนมเยลลี่ แต่เนื้อสัมผัสของวุ้นจะมีความแข็งมากกว่าขนมเยลลี่ ในปัจจุบันมีวุ้นหลากหลายชนิด เช่น วุ้นกะทิ วุ้นใบเตย วุ้นมะพร้าวอ่อน และวุ้นสังขยา เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์วุ้นทำมาจากผงวุ้น ซึ่งเป็นสารก่อเจลที่สามารถจับกับน้ำได้ เมื่อนำมาละลายในน้ำหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำร้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจะเกิดสารละลายที่ให้เนื้อสัมผัสเป็นเจลได้ สำหรับขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์วุ้นโดยทั่วไปจะนำผงวุ้นมาละลายในน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม หลังจากนั้นเติมน้ำตาลทรายแล้วต้มให้เดือด อาจมีการเติมส่วนผสมอย่างอื่น เช่น เนื้อผลไม้ น้ำผลไม้ โดยวุ้นที่ต้มให้เดือดแล้วจะนำมาเทใส่พิมพ์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ก็จะเกิดเป็นเจล นอกจากนี้ยังมีการแต่งกลิ่นเพื่อให้วุ้นมีความหลากหลายมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญในการทำผลิตภัณฑ์วุ้น มักประกอบไปด้วย น้ำตาล ผงวุ้น และเกลือ เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์วุ้นกรอบจะมีการเพิ่มขึ้นตอนโดยการนำผลิตภัณฑ์วุ้นที่ได้มาทำให้แห้งจนกระทั่งเกิดเกล็ดน้ำตาลเคลือบที่ผิว สำหรับการตลาดของวุ้นในปัจจุบัน มีการเปลี่ยนจากขนมหวานทั่วไป ไปสู่ขนมเพื่อสุขภาพมากขึ้น เช่น เป็นวุ้นเพื่อสุขภาพ น้ำตาลน้อย และวุ้นจากผัก เป็นต้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์วุ้น เช่น การผลิตวุ้นจากน้ำผักพื้นบ้าน [1] การพัฒนาผลิตภัณฑ์วุ้นกรอบจากลำไยตากเกรด [2] การพัฒนาผลิตภัณฑ์วุ้นกรอบ สตรอว์เบอร์รีลดพลังงานด้วยหญ้าหวาน [3] และการพัฒนาผลิตภัณฑ์วุ้นโภชนาการพลังงานสูงสำหรับผู้สูงอายุ ผู้ป่วยที่มีภาวะเบื่ออาหาร [4] เป็นต้น

ผักเคล (Kale) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica oleracea* L. var. *acephala* เป็นผักเขียวในวงศ์

Brassicaceae [5] สำหรับประเทศไทยนิยมนำผักเคลมาทำเป็นเมนูอาหารหลายอย่าง เช่น สลัดผักเคล ผักเคลอบชีส ผักเคลผัดไข่ แกงจืดผักไข่ และผักเคลอบกรอบ เป็นต้น [6] ผักเคลได้รับการยอมรับให้เป็นราชินีผักใบเขียว เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและหลากหลาย เช่น มีใยอาหารสูง ช่วยลดความเสี่ยงโรคเบาหวาน มีวิตามินเอ วิตามินซี วิตามินเค แคลเซียมและโพแทสเซียม เป็นต้น โดยพบว่าผักเคลมีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 2.38 ไขมันร้อยละ 0.26 โปรตีนร้อยละ 11.67 ความชื้นร้อยละ 81.38 ใยอาหารร้อยละ 3.00% เถ้าร้อยละ 1.33 และพลังงานร้อยละ 58.46 [7] มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำผักเคลมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักเคลอบกรอบ [8] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจากผักเคลที่เหลือทิ้ง [9] เป็นต้น ผักเคลถือว่าเป็นผักที่มีประโยชน์ มีสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันโรคความเสื่อมเรื้อรังได้ ซึ่งการรับประทานผักเคลนอกจากจะรับประทานผักเคลในรูปแบบผักสด รูปแบบต้มและนึ่งแล้ว ในปัจจุบันยังนิยมนำผักเคลมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ผักเคลผงเพื่อเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาอีกด้วย มีงานวิจัยได้ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของผลิตภัณฑ์ผักเคลผงที่จำหน่ายในประเทศไทย 10 ตัวอย่าง พบว่า ผักเคลผงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมอยู่ที่ 61.78-262.15 mg GAE/g และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่ที่ 4441.81-12438.16 μ MTE/g [10] จากประโยชน์ของผักเคลที่กล่าวมา ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการนำผักเคลผงมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ขนมไทย นั่นก็คือผลิตภัณฑ์วุ้น เนื่องจากวุ้นเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่คนทั่วไปนิยมบริโภคสามารถรับประทานได้ทุกเพศ ทุกวัย โดยส่วนผสมหลักของวุ้น จะประกอบไปด้วยผงวุ้น น้ำตาล และเกลือเป็นหลัก การประยุกต์นำผงผักเคลใส่ลงไปในตัววุ้น จะเพิ่มสีกลิ่นและกลิ่นให้กับวุ้นโดยไม่ต้องพึ่งสีสังเคราะห์อีกด้วย โดยมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมผงผักลงในอาหารประเภทวุ้น เช่น ผลิตภัณฑ์เยลลี่คอลลาเจนสูตรน้ำตาลต่ำจาก

ผงผักและผงผลไม้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เติมผงผักและผลไม้ทั้งหมด 5 ระดับคือ ร้อยละ 0 ร้อยละ 2 ร้อยละ 4 ร้อยละ 6 ร้อยละ 8 และร้อยละ 10 โดยพบว่าเยลลี่ที่เติมผงผักและผงผลไม้ร้อยละ 10 ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด และเมื่อเติมผงผักผลไม้มากขึ้น ปริมาณฟลาโวนอยด์และโพลีฟีนอลก็เพิ่มขึ้นด้วย [11] โดยจะศึกษาปริมาณผงผักที่เหมาะสมที่เสริมลงไปในการผลิตเยลลี่วุ้นและศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผัก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ศึกษาปริมาณผงผักผลไม้ที่เสริมลงไปในการผลิตเยลลี่วุ้น

ทำผลิตภัณฑ์วุ้น ซึ่งส่วนผสมประกอบไปด้วยนมสด 400 มิลลิลิตร น้ำ 375 มิลลิลิตร นมข้นหวาน 90 มิลลิลิตร น้ำตาล 10 กรัม และผงวุ้น 5 กรัม สำหรับขั้นตอนการทำวุ้น คือ จะนำผงวุ้นไปแช่ในน้ำเปล่าเป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้ผงวุ้นอืดตัวและละลายในน้ำได้ดี หลังจากนั้นนำผงวุ้นและน้ำไปตั้งไฟ ต้มจนกระทั่งผงวุ้นละลาย เมื่อผงวุ้นละลายดีแล้วให้เติมน้ำตาลทรายและนมข้นหวาน คนจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดละลาย จึงทำการเติมนมสด ต้มจนกระทั่งเดือด แล้วปิดไฟ หลังจากนั้นนำวุ้นมาหยอดใส่พิมพ์ซิลิโคนรูปทรงกลม แล้วนำวุ้นไปแช่ในตู้เย็นเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง วุ้นก็จะเซตตัว จึงทำการแกะวุ้นออกจากพิมพ์ซิลิโคน

ทำการศึกษาปริมาณผงผักผลไม้ที่เสริมลงไปในการผลิตเยลลี่วุ้นทั้งหมด 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (สูตร Control), ร้อยละ 0.5, ร้อยละ 1 และร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักน้ำ ซึ่งในขั้นตอนการเสริมผงผักผลไม้ลงไปในวุ้นนั้น จะทำเติมผงผักผลไม้หลังจากที่เติมนมสด นำผลิตภัณฑ์วุ้นที่เสริมผงผักผลไม้ทั้งหมด 4 ระดับ ไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่อไป คือ ด้านการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส การวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส และการวิเคราะห์ค่าสี เป็นต้น

2.2 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักผลไม้ทั้ง 4 ระดับ มาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน (Untrained panel) จำนวน 30 คน โดยผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสจะเป็นอาสาสมัครเพศหญิงหรือชาย มีอายุอยู่ระหว่าง 21-24 ปี และมีสุขภาพแข็งแรง ทำการทดสอบ 2 ครั้ง สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักผลไม้แต่ละตัวอย่างจะถูกจัดให้แก่ผู้ทดสอบชิม โดยจะบรรจุอยู่ในถ้วยชิม และติดรหัสเลขสุ่ม 3 ตัว สำหรับเกณฑ์การให้คะแนนความชอบ จะให้คะแนนความชอบ 9 จุด (9-Point hedonic scale test) โดยมีเกณฑ์การให้คะแนน ดังนี้

- 1 = ไม่ชอบมากที่สุด
- 2 = ไม่ชอบมาก
- 3 = ไม่ชอบปานกลาง
- 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย
- 5 = เฉยๆ
- 6 = ชอบเล็กน้อย
- 7 = ชอบปานกลาง
- 8 = ชอบมาก
- 9 = ชอบมากที่สุด

ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

2.3 การวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส

เตรียมผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมผงผักผลไม้ทั้ง 4 ระดับ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร มาวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น CT3 (Brookfield, USA) โดยใช้หัววัดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาว 35 มิลลิเมตร โดยหัววัดกดลงไปใน

ผลิตภัณฑ์วันเล็ก 50% ของความสูงเดิม ด้วยความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าที่วัดได้จะรายงานเป็นค่าแรงที่ใช้มีหน่วยเป็นกรัม (g)

2.4 การวิเคราะห์ค่าสี

ผลิตภัณฑ์วันเสริมผงผักเคลทั้ง 4 ระดับ ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Colorimeter รุ่น CR-400 (Konica Minolta, Japan) โดยค่าสีที่ได้จะรายงานผลออกมาให้ค่า L^* , a^* และ b^* ซึ่งแปลผลดังนี้ ค่า L^* หมายถึง ค่าความสว่าง (ดำ=0, ขาว=100) ค่า a^* หมายถึง สีแดงหรือสีเขียว (+สีแดง, -สีเขียว) และค่า b^* หมายถึง สีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (+สีเหลือง, -สีน้ำเงิน) ทำการวัดทั้งหมด 5 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส จะวางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Random complete block design, RCBD) โดยกำหนดให้ผู้ทดสอบชิมเป็นความแปรปรวนจากบล็อก ในขณะที่ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสและค่าสี จะวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตวันเสริมผงผักเคล

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเพื่อหาแนวทางการวางแผนกำไรผลิตภัณฑ์ ใช้การวิเคราะห์ สัจเคราะห์ ข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลได้มา นำเสนอข้อมูลในรูปแบบการคำนวณการบรรยายและสรุปผลการวิจัยโดยใช้สูตรการคำนวณ ดังนี้

1) สูตรการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย [12]
 ต้นทุนการผลิต = วัตถุดิบตรง + ค่าใช้จ่ายในการผลิต

2) สูตรการวิเคราะห์ราคาขายตามวิธีอัตราการบวกเพิ่ม (Markub) และการวางแผนกำไรที่ต้องการ [13]
 ราคาขาย = ต้นทุนรวม + (อัตราการบวกเพิ่ม × ต้นทุนรวม) อัตราการบวกเพิ่ม = กำไรที่ต้องการ/ต้นทุนทั้งหมด

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์วันเสริมผงผักเคลทั้ง 4 ระดับ (สูตร Control, ร้อยละ 0.5, ร้อยละ 1 และร้อยละ 1.5) แสดงได้ดังตารางที่ 1 พบว่าลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์วันเสริมผงผักเคลสูตร Control และร้อยละ 1.5 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยยิ่งเพิ่มปริมาณผงผักเคลมากขึ้น ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏลดลง ซึ่งในขั้นตอนการทำวันจะนำวันมาเทใส่พิมพ์ซิลิโคนทรงกลมที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์วันเสริมผงผักเคลทั้ง 4 ระดับจะมีลักษณะเป็นทรงกลมเหมือนกัน แต่สาเหตุที่ทำให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏของสูตร Control และร้อยละ 1.5 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากผงผักเคลที่เสริมลงไปมีลักษณะเป็นผง ยิ่งเสริมผงผักเคลลงไปในผลิตภัณฑ์วัน ทำให้ลักษณะปรากฏของวันมีลักษณะเป็นผงผักเคลกระจายเป็นจุดเล็กๆ จึงมีผลต่อการวัดค่าสี การกระจายตัวอยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์วันส่งผลต่อคะแนนความชอบของผู้ทดสอบชิม นอกจากนี้ผงผักเคลมีลักษณะเป็นของแข็ง เมื่อนำไปผสมกับส่วนผสมของวันซึ่งเป็นของเหลวทั้งหมด ผงผักเคลไม่สามารถละลายในน้ำได้ จึงทำให้ไม่สามารถละลายเข้ากับส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกับวันได้ จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์วันมีเนื้อสัมผัสไม่เนียน ในขณะที่คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ก็พบว่า ผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคลสูตร Control และร้อยละ 1.5 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 1 ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคล 4 ระดับ

คุณลักษณะ	ปริมาณที่เสริมผงผักเคล			
	ร้อยละ 0 (สูตร Control)	ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1	ร้อยละ 1.5
ลักษณะปรากฏ	7.93±1.52 ^a	7.53±1.59 ^{ab}	7.20±1.44 ^b	6.53±0.86 ^c
สี	7.56±1.44 ^a	7.13±1.43 ^{ab}	7.03±1.30 ^{ab}	6.53±1.28 ^b
กลิ่นผักเคล	7.26±1.05 ^a	6.85±1.44 ^{ab}	6.43±1.22 ^b	6.36±1.37 ^b
รสชาติผักเคล	7.30±1.64 ^a	7.10±1.02 ^a	6.16±0.91 ^b	5.93±1.28 ^b
เนื้อสัมผัส (ความแข็ง)	7.26±1.48 ^a	7.16±1.36 ^a	6.83±1.39 ^{ab}	6.46±1.45 ^b
ความชอบโดยรวม	7.06±1.92 ^{ab}	7.30±1.31 ^a	6.40±1.33 ^b	5.60±1.42 ^c

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าสีและค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคล 4 ระดับ

ปัจจัยทางคุณภาพ	ปริมาณที่เสริมผงผักเคล			
	ร้อยละ 0 (สูตร Control)	ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1	ร้อยละ 1.5
ค่าสี				
L*	80.43±2.24 ^a	73.22±2.33 ^b	73.01±1.22 ^b	68.90±2.86 ^c
a*	-2.91±0.11 ^a	-6.46±0.27 ^b	-7.62±0.27 ^c	-8.61±0.38 ^d
b*	4.96±0.28 ^d	12.51±0.31 ^c	13.52±0.68 ^b	14.92±0.57 ^a
Hardness (g)	263.75±18.74 ^a	244.87±11.72 ^{ab}	233.14±12.29 ^b	218.3±21.56 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

และเมื่อพิจารณาภาพรวมของตารางที่ 1 ก็พบว่า ปริมาณผงผักเคลที่เพิ่มมากขึ้น คะแนนความชอบทุกคุณลักษณะก็มีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย เนื่องจากผงผักเคลมีสีเขียว ยิ่งเสริมเข้าไปผลิตภัณฑ์วันที่จะเป็นสีเขียวมากขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 1) จากภาพพบว่า ผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคลร้อยละ 1.5 มีสีเขียวมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าสี (a*) ในตารางที่ 2 โดยพบว่า ผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคลทั้ง 4 ระดับ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ผงผักเคลยังมีกลิ่นของผัก ซึ่งจะไปดับกลิ่นหอมของนมและกลิ่นของน้ำตาลเมื่อโดนความร้อน

จึงทำให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นลดลงเช่นกัน ส่วนคะแนนความชอบด้านรสชาติก็พบว่า มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากผงผักเคลมีรสชาติขมยิ่งใส่ลงไปผลิตภัณฑ์วันที่มากขึ้นเรื่อยๆ รสชาติของผงผักเคลจะเด่นชัดมากขึ้น ส่วนคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส (ตารางที่ 1) พบว่าผู้ทดสอบชิมก็ให้คะแนนความชอบลดลงเมื่อปริมาณผงผักเคลเพิ่มมากขึ้น โดยผลิตภัณฑ์วันที่เสริมผงผักเคลร้อยละ 1.5 จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสนิ่มและเนื้อสัมผัสไม่เนียน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องการเติมผงผักเคลฟรุตดรายลงไปในเส้นพาสต้า โดยทดลองเติมไป 4 ระดับคือ ร้อยละ 0, ร้อยละ 1, ร้อยละ 3 และ ร้อยละ 5

ซึ่งผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับพาสต้าที่เติมผงเคลฟริตดรายร้อยละ 3 มากที่สุด เมื่อเพิ่มผงผักเคลมากขึ้นจะส่งผลให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นและเนื้อสัมผัส

เนื่องจากกลิ่นผักเคลมีความเข้มข้นมากเกินไป และการเสริมผักเคลที่มากขึ้นจะทำให้โปรตีนกลูเตนอ่อนแอลงทำให้เส้นพาสต้ามีความยืดหยุ่นลดลง [14]



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 1 ผลิตรัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลที่ปริมาณแตกต่างกัน

(ก) เสริมผงผักเคลร้อยละ 0 (สูตร Control) (ข) เสริมผงผักเคลร้อยละ 0.5

(ค) เสริมผงผักเคลร้อยละ 1 (ง) เสริมผงผักเคลร้อยละ 1.5

เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบด้านความชอบโดยรวม พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมผลิตรัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลร้อยละ 0.5 มากที่สุด ซึ่งผลิตรัณฑ์วุ้นเสริมผงผักเคลที่ร้อยละ 0.5 และสูตร Control ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ภาพรวมผลการทดลองตารางที่ 1 พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูตร Control มากที่สุด แต่เนื่องจากผลิตรัณฑ์วุ้นสูตร Control และสูตรที่เสริมผงผักเคลร้อยละ 0.5 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ในทุกด้าน (ลักษณะปรากฏ, สี, กลิ่น, รสชาติ, เนื้อสัมผัส และ

ความชอบโดยรวม) จึงกล่าวได้ว่า ผลิตรัณฑ์วุ้นสามารถเสริมผงผักเคลได้ถึงร้อยละ 0.5 เมื่อพิจารณาค่า Hardness ในตารางที่ 2 ก็พบว่า ผลิตรัณฑ์วุ้นที่เสริมผงผักเคลร้อยละ 0 และร้อยละ 1.5 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเพิ่มปริมาณผงผักเคลมากขึ้น ค่า Hardness มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งกลไกการเกิดเจลของวุ้น จะเกิดขึ้นเมื่อนำผงวุ้นมาละลายในอุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ในระยะนี้โครงสร้างโมเลกุลของวุ้นจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบเมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลง สายพอลิเมอร์จะเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยจุดที่เชื่อมต่อนี้

จะเรียกว่า Junction zone ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้น ทำให้เกิดโครงร่างร่างแห 3 มิติ ทำให้เจลมีความแข็งแรงมากขึ้น [15] แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการเสริมผงผักเคลลงไปในผลิตภัณฑ์วุ้น ซึ่งการเสริมผงผักเคลในระดับต่ำยังไม่ส่งผลต่อโครงสร้างเจลมากนัก แต่การที่มีค่า Hardness ลดลง อาจเป็นไปได้ว่าผงผักเคลที่เสริมลงไปในระดับที่สูงขึ้น จะทำให้โครงสร้างเจลอ่อนตัวลง โดยอนุภาคของผงผักเคลและเส้นใยอาหารในผงผักเคลจะไปรบกวนการสร้างโครงข่ายเจล โดยไปขัดขวางการเชื่อมต่อของจุด Junction zone ทำให้โครงสร้างเจลไม่ต่อเนื่องและมีความแน่นลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งต่ำลง เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตวุ้นเสริมผงผักเคล แสดงได้ดังตารางที่ 3

การคำนวณต้นทุนและราคาขาย จะคำนวณดังนี้
ต้นทุนการผลิตรวม คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตวุ้นผักเคล ได้แก่ ค่าแก๊ส ค่าไฟ บรรจุภัณฑ์ ประมาณ 8.35 บาท/ สูตรต้นทุนการผลิต = วัตถุดิบทางตรง + ค่าใช้จ่ายในการผลิต

ต้นทุนการผลิต = 43.5 + 8.35 = 51.85 บาท/สูตร

หากแบ่งเป็น 10 ชิ้น ต่อสูตร :

ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย = 51.85 ÷ 10 = 5.19 บาท/ชิ้น

ตารางที่ 3 วัตถุดิบและต้นทุนการผลิตวุ้นผักเคล (1 สูตร)

ส่วนผสม	ปริมาณ	ราคา/หน่วย	ราคา/กรัมที่ใช้จริง
ผงวุ้น	5 กรัม	ราคา 50 บาท / 25 กรัม	10 บาท
น้ำเปล่า	375 มิลลิตร	ราคา 15 บาท / 1500 มิลลิตร	3.75 บาท
นมสด	400 มิลลิตร	ราคา 100 บาท / 2000 มิลลิตร	20 บาท
นมข้นหวาน	90 มิลลิตร	ราคา 33 บาท / 388 กรัม	7.65 บาท
น้ำตาล	10 กรัม	ราคา 25 บาท / 1000 กรัม	0.25 บาท
ผงผักเคล	1.87 กรัม	ราคา 100 บาท/ 99 กรัม	1.85 บาท
รวมน้ำหนัก / สูตร		881.87 กรัม	
รวมวัตถุดิบทางตรง			43.5 บาท

ตารางที่ 4 สรุปการวิเคราะห์ต้นทุนและราคาขายวุ้นผักเคล

รายการ	รายการมูลค่า (บาท)
ต้นทุนวัตถุดิบทางตรงรวม (1 สูตร)	43.5
ค่าใช้จ่ายในการผลิต (overhead)	8.35
ต้นทุนการผลิตรวม (1 สูตร)	51.85
จำนวนชิ้นต่อสูตร	10 ชิ้น
ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย	5.19
อัตราค่าบริการเพิ่ม (Markup 50%)	2.60
ราคาขายที่แนะนำ	7.79
ราคาขายจริง (กำหนด)	10.00
กำไรต่อชิ้น	2.29
% กำไรต่อต้นทุน	100%

จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตวันผักเคลพบว่าต้นทุนวัตถุดิบทางตรงรวมอยู่ที่ 43.5 บาทต่อสูตร เมื่อรวมค่าใช้จ่ายในการผลิต (Overhead) อีก 8.35 บาท ทำให้ต้นทุนรวมอยู่ที่ 51.85 บาทต่อสูตร หรือคิดเป็น 5.19 บาทต่อหน่วย (แบ่ง 10 ชิ้นต่อสูตร) เมื่อกำหนดอัตราการบวกเพิ่ม (Markup) ที่ร้อยละ 50 ราคาขายที่เหมาะสมอยู่ที่ 7.79 บาทต่อชิ้น อย่างไรก็ตาม หากกำหนดราคาขายจริงที่ 10 บาทต่อชิ้น จะกำไร 2.29 บาทต่อชิ้น คิดเป็นอัตรากำไรร้อยละ 100 ของต้นทุน ซึ่งถือว่าเป็นสูตรที่มีศักยภาพทางการค้าสูง

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์วันเสริมผงผักเคล 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0, ร้อยละ 0.5, ร้อยละ 1 และ ร้อยละ 1.5 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณผงผักเคลที่เสริมลงไป ส่งผลต่อคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยผงผักเคลสามารถเสริมได้สูงสุดถึงร้อยละ 0.5 โดยเมื่อเสริมผงผักเคลมากขึ้น จะส่งผลให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสลดลงในทุกด้าน เมื่อเพิ่มปริมาณผงผักเคลมากขึ้น จะทำให้ผลิตภัณฑ์วันมีสีเขียวมากขึ้น มีกลิ่นและรสชาติของผักเคล รวมถึงทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์วันนิ่มลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าผงผักเคลที่เสริมลงไป ไปขัดขวางการเกิดโครงสร้างร่างแหของวัน ทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์วันไม่แข็งแรง สำหรับประโยชน์จากงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาแนวทางการนำไปใช้ในการนำผงผักเคลมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์วันซึ่งเป็นขนมไทยชนิดหนึ่ง เพื่อเพิ่มคุณค่าทางสารอาหารให้แก่ผลิตภัณฑ์วัน รวมถึงทำให้เกิดการบริโภคผักเคลได้ง่ายขึ้น เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้ไม่ชอบบริโภคผัก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือ-อุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Pongpool. "Jelly from local vegetables juice," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 1521-1526, 2019.
- [2] N. Chareonphun. "Development of crispy jelly product from low-grade langan," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 26, no. 5, pp. 834-845, 2018.
- [3] A. Maitreedech, P. Pomasa, W. Boonsan, and S. Takeungwongtrakul. "Development of reduced calorie strawberry crispy jelly product with stevia," *Burapha Science Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 141-150, 2020.
- [4] Klinmalai, W. Borriboontanukul, and S. Suwannanwong. "High energy nutrition jelly," *Journal of Home economics Technology, RMUTP*, vol. 1, no. 1, pp. 55-61, 2019.
- [5] J.W. Fahey. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 2nd ed. Academy press, 2003.
- [6] W. Sumranram and S. Ruangsanka. "Values of kale for health and contemporary culture," *Journal of Roi Kaensam Academi*, vol. 9, no. 9, pp. 1559-1567, 2024.
- [7] P.K. Emebu and J.U. Anyika. "Proximate and mineral composition of kale (Brassica oleracea) grown in delta state, Nigeria," *Pakistan journal of nutrition*, vol. 10, no. 2, pp. 190-194, 2011.

- [8] T. Rithmanee. "Development of crispy vegetable chip from kale," *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 72-82, 2024.
- [9] R. Saenthumpol, A. Suwanchun, and T. Chantararat. "Development of healthy snack products from kale leftovers of sufficiency community enterprise group in Phetchabun province," *Academic Journal Uttaradit Rajabhat University*, vol. 18, no. 1, pp. 157-175, 2023.
- [10] K. Kunathip. "The study of total phenolic content and antioxidant activity of kale powder products," M.S. thesis, Dept. Anti-aging and Regen. Med., Dhurakij Pundit Univ, Bangkok, Thailand, 2021.
- [11] J. Yu, P. S. J. Park, and H. J. Lee, "Physicochemical properties and sensory evaluation of low-sugar collagen jelly using fruit and vegetable powder," *Foods*, vol. 14. No. 19, 2025.
- [12] P. Kittimanorom, *Management Accounting*. Bangkok: O.S. Printing House, 2017.
- [13] S. Meeampol,. *Managerial Accounting* 23rd ed.. Bangkok : Sematham, 2018.
- [14] P. Pongtongkam J. Moolwong, T. Chysirichote, and T. Chuacharoen, "Effect of adding freeze-dried kale powder on physicochemical, functional, and sensory properties of fresh pasta," *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, vol. 12. no.2, pp. 103-113, 2024.
- [15] B. Dai and S. Matsukawa, "NMR studies of the gelation mechanism and molecular dynamics in agar solutions," *Food Hydrocolloids*, vol. 26, no.1, pp. 181-186, 2012.

การจัดสรรภาระงานยกอย่างเหมาะสม โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MILP ภายใต้ข้อจำกัดทางเวลาและการยศาสตร์

กิตติพงศ์ ศรีสวาท^{1*} ประจวบ กล่อมจิตร¹ และ ธนิตา หนูทวี²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

¹เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย 73000

²เลขที่ 225 ถนน พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10330

รับบทความ 9 พฤศจิกายน 2568 แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 24 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองการจัดสรรภาระงานยกอย่างเหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Linear Programming: MILP) ภายใต้ภายใต้แนวคิดการจัดสรรเชิงกำหนด (Deterministic Allocation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในงานยกซ้ำซ้อน ข้อมูลเชิงทดลองถูกรวบรวมจากอาสาสมัครจำนวน 10 คน ในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมสภาพแวดล้อม โดยแต่ละคนปฏิบัติงานยกวัตถุหนัก 10 กิโลกรัม พร้อมบันทึกวิดีโอเพื่อวิเคราะห์เวลาและท่าทางการยกในแต่ละช่วง และประเมินความเสี่ยงด้วยคะแนน RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลารวมต่อรอบการยกเท่ากับ 7.17 วินาที และคะแนน RULA อยู่ในระดับความเสี่ยงปานกลาง แบบจำลอง MILP ถูกนำมาจัดสรรภาระงานในสามกรณี ได้แก่ (A) ลดภาระรวมสูงสุด, (B) การจัดสรรยุติธรรม และ (C) การกระจายภาระเท่ากัน ผลการหาค่าเหมาะที่สุดพบว่า กรณี A ให้ค่าภาระรวมต่ำที่สุดแต่ไม่ยุติธรรม ขณะที่กรณี B ให้การจัดสรรสมดุลทั้งด้านประสิทธิภาพและความเป็นธรรม ส่วนกรณี C เหมาะกับการประยุกต์ใช้จริงในงานที่ต้องการการบริหารจัดการง่าย ผลการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) โดยปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงร้อยละ 10 ยืนยันว่าแบบจำลองมีความเสถียรสูงและไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า MILP สามารถใช้เป็นกรอบการตัดสินใจเชิงปริมาณในการออกแบบนโยบายการจัดสรรงานยกที่ปลอดภัย ลดภาระทางกายภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : การจัดสรรภาระงานยก; แบบจำลอง MILP; การยศาสตร์; การประเมิน RULA; การจัดสรรเชิงกำหนด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 1731 4559, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: srisawat_k4@silpakorn.edu

Optimal Allocation of Lifting Workload Using MILP Model under Time and Ergonomic Constraints

Kittipong Srisawat^{1*} Prachuab Klomjit¹ and Tanisa Nootawee²

¹Faculty of Engineering and Industrial technology, Silpakorn University

²Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

¹6, Rajamankha Nai Rd, Phra Prathom Chedi Sub-district, Mueang Nakhon Pathom District, Nakhon Pathom, 73000

²225 Phayathai Road, Pathum Wan Subdistrict, Pathum Wan District, Bangkok, 10330

Received 9 November 2025; Revised 12 June 2026; Accepted 24 June 2026

Abstract

This study aims to develop an optimal workload allocation model for manual lifting tasks by applying a Mixed Integer Linear Programming (MILP) framework under the Deterministic Allocation concept. The objective is to enhance operational efficiency while minimizing ergonomic risks in repetitive lifting activities. Experimental data were collected from ten volunteers in a controlled laboratory environment. Each participant performed repetitive lifting tasks of 10 kg objects, while video recordings were used to analyze time duration and postural behavior in each lifting phase. The ergonomic risk level was assessed using the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method. The results showed that the average lifting cycle time was 7.17 seconds, and the overall RULA scores indicated a moderate risk level. The MILP model was then applied to determine optimal workload allocation under three scenarios: (A) minimum total ergonomic load, (B) fair distribution, and (C) equal distribution. The findings revealed that scenario A achieved the lowest total risk but lacked fairness, while scenario B provided a balanced allocation between efficiency and equity. Scenario C demonstrated practicality for real applications requiring ease of management. Sensitivity analysis $\pm 10\%$ confirmed the model's robustness and low sensitivity to parameter variations. Overall, the study highlights that MILP can serve as a quantitative decision-making framework for designing safe, ergonomic, and efficient lifting workload allocation policies.

Keywords : Lifting workload allocation; MILP model; Ergonomics; RULA assessment; Deterministic allocation

** Corresponding Author. Tel.: +669 1731 4559, E-mail Address: srisawat_k4@silpakorn.edu*

1. บทนำ

ภาระทางกายจากงานยกซ้ำซ้อน (repetitive lifting) เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดกลุ่มอาการบาดเจ็บของระบบโครงร่างและกล้ามเนื้อที่เกี่ยวข้องเนื่องจากการทำงาน (Work-related Musculoskeletal Disorders: WMSDs) โดยเฉพาะบริเวณหลังส่วนล่าง ไหล่ และข้อมือ ซึ่งกระทบทั้งประสิทธิภาพการทำงานและต้นทุนด้านสุขภาพขององค์กร [1] ในอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมนุษย์ การยกของซ้ำ ๆ ระยะเวลาสัมพันธ์กับอาการปวดเรื้อรังและสมรรถภาพการทำงานที่ลดลง ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงานและประสิทธิภาพระบบการผลิต งานวิจัยภาคสนามในประเทศไทยพบว่า กลุ่มที่มีการยกซ้ำและท่าทางไม่เหมาะสมมีคะแนนเสี่ยงการยศาสตร์สูงและอาการกล้ามเนื้อ/ปวดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [2], [3] ขณะเดียวกัน การปรับสถานงาน เช่น ปรับรูปแบบการทำงาน ตำแหน่งวัตถุ หรือใช้อุปกรณ์ช่วยยกสามารถลดคะแนน RULA/REBA และลดอาการไม่สบายได้ [4], [5] รวมถึงการยศาสตร์แบบมีส่วนร่วมและการให้ความรู้เรื่องท่าทางที่ถูกต้องก็ช่วยลดความเสี่ยงได้ต่อเนื่องในระยะยาว

การออกแบบมาตรการเชิงปฏิบัติการเพื่อลดความเสี่ยงของกระบวนการที่มีการยกซ้ำยังท้าทายเพราะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายมิติ เช่น ความถี่การยก น้ำหนัก ท่าทาง ลักษณะการเคลื่อนไหวซ้ำ และการสะสมความเมื่อยล้า จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงปริมาณในการค้นหาทางเลือกที่ลดภาระกล้ามเนื้อโดยไม่กระทบประสิทธิภาพสายการผลิต ในบริบทนี้ งานวิจัยเชิงปริมาณโดยเฉพาะแบบจำลองเชิงเพิ่มประสิทธิภาพ (optimization) และโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ถูกนำมาใช้เชื่อมโยงผลประโยชน์ความเสี่ยงทางการยศาสตร์เข้ากับข้อจำกัดของระบบ เพื่อกำหนดนโยบายจัดตารางหรืองานยกที่ลดความเสี่ยงรวม [6],[7] ทั้งนี้ มีหลักฐานว่ารูปแบบเชิงเพิ่มประสิทธิภาพสามารถจำลองพฤติกรรมกรยกและคาดการณ์ภาระ

ทางชีวกลศาสตร์ได้ดี และเมื่อผสานกับข้อมูลประเมินการยศาสตร์ จะช่วยเสนอรูปแบบการปรับเปลี่ยนงานที่เหมาะสมทั้งด้านสุขภาพและประสิทธิภาพ [7] ขณะเดียวกัน เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การประมวลผลข้อมูล machine learning และระบบตรวจจับท่าทางแบบเรียลไทม์ ยังช่วยติดตามและวิเคราะห์ความเสี่ยงอย่างต่อเนื่องเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารและวิศวกร [1]

งานวิจัยนี้จึงเสนอกรอบการทำงานโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) ในรูปแบบโมเดล MILP ด้วยวิธี Deterministic allocation เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ในงานยกซ้ำซ้อน โดยใช้ข้อมูลการทดลองจากห้องปฏิบัติการจริงเพื่อศึกษาการจัดสรรงานที่เหมาะสมระหว่างความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้งผลลัพธ์ยังคาดว่าจะเป็นแนวทางบริหารจัดการภาระงานเชิงระบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่มีลักษณะงานยกซ้ำซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญเพื่อใช้เป็นแนวทางและกรอบในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้

2.1.1 งานยกซ้ำซ้อน (repetitive lifting)

งานยกซ้ำซ้อน หรือการยกเคลื่อนย้ายวัสดุด้วยมืออย่างต่อเนื่อง เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบกระดูกและกล้ามเนื้อจากการทำงาน WMSDs โดยเฉพาะบริเวณหลังส่วนล่าง ไหล่ และข้อมือ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถภาพและคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน [8] งานวิจัยในประเทศไทยพบว่า แรงงานหัตถกรรมไม้ไผ่ที่ยกหรือถือวัสดุบ่อยมีอาการผิดปกติทางโครงร่าง

กล้ามเนื้อสัมพันธ์กับลักษณะงานยก [9] การยกซ้ำซ้อน ครอบคลุมทั้งน้ำหนัก ความถี่ ท่าทาง ระยะเวลาทำงาน และความเมื่อยล้าสะสม ซึ่งร่วมกันเพิ่มภาระทางชีวกลศาสตร์จนร่างกายฟื้นตัวไม่ทัน [10]

การประเมินภาระงานดังกล่าวสามารถทำได้ด้วย NIOSH Lifting Equation เพื่อคำนวณดัชนียก (Lifting Index) โดย NIOSH แนะนำว่า $LI > 1.0$ แสดงถึงภาระที่มีความเสี่ยง [11] งานภาคสนามในพนักงานบรรจุแก๊ส จังหวัดสมุทรสาคร พบความชุกของ WMSDs สูงจากการยก เคลื่อนย้าย และท่าทางที่ไม่เหมาะสม [12] ดังนั้น การพิจารณาความถี่ น้ำหนัก ท่าทาง และเวลาพักจึงมีความจำเป็น เพื่อออกแบบมาตรการเชิงระบบด้วยแบบจำลองเชิงเส้น เพื่อลดภาระกล้ามเนื้อและความเสี่ยง WMSDs โดยไม่กระทบประสิทธิภาพการผลิต

2.1.2 การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์ (Ergonomic Risk Assessment)

การประเมินความเสี่ยงทางการยศาสตร์เป็นขั้นตอนสำคัญในการจัดการภาระงานยกซ้ำ เครื่องมือที่ใช้บ่อยได้แก่ RULA, REBA และดัชนียก (Lifting Index) ของ NIOSH ซึ่งช่วยประเมินท่าทาง น้ำหนัก ความถี่ และระยะเวลาการยก [13], [14], [15] การรวมเครื่องมือเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อลดความเสี่ยง สำหรับ RULA จะประเมินร่างกายส่วนบนและลำตัวโดยคำนวณคะแนนความเสี่ยงเชิงท่าทาง (Postural Load Score) เพื่อระบุระดับความเสี่ยงและความจำเป็นในการปรับปรุงสภาพการทำงาน โดยมีขั้นตอนและเกณฑ์ประเมินดังแสดงในรูปที่ 1

จากนั้นนำคะแนนทั้งสองส่วนมารวมเพื่อประเมินระดับความเสี่ยง RULA ตามตารางที่ 1

The image shows the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) form. It includes diagrams of the upper limb and torso for assessment. The form is divided into three main sections: A (Upper Limb), B (Torso), and C (Overall Risk). Each section has a grid for rating different postures. The final risk score is calculated based on the ratings in sections A and B, and is shown in section C. The form also includes a section for 'Notes' and a 'Signature' line.

รูปที่ 1 ขั้นตอนในการประเมินร่างกายส่วนบน
Rapid Upper Limb Assessment: RULA [16]

ตารางที่ 1 การแปลผลคะแนนความเสี่ยงรวม RULA

คะแนน	การแปลผล
1-2	ยอมรับได้ แต่อาจจะมีปัญหาทางการยศาสตร์ ถ้าถ้ามีการทำงานดังกล่าวซ้ำๆต่อเนื่องเป็นเวลานานกว่าเดิม
3-4	ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและติดตามวัดผลอย่างต่อเนื่องอาจจะจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบงานใหม่
5-6	งานนั้นเริ่มเป็นปัญหา ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม และควรปรับปรุง
7	งานนั้นมีปัญหาทางการยศาสตร์ และต้องมีการปรับปรุงทันที

2.1.3 การออกแบบสถานีงานในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Workstation Design)

การออกแบบสถานีทำงานในห้องปฏิบัติการมีความสำคัญต่อการลดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์และเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะงานที่ทำซ้ำหรือยกอุปกรณ์บ่อย การจัดวางเครื่องมือให้เหมาะกับสรีระช่วยลดแรงกดดันทางกายและอาการเมื่อยล้า การใช้เครื่องมือประเมิน เช่น RULA และ REBA รวมถึงเทคโนโลยีตรวจจับท่าทางหรือการวิเคราะห์ภาพสามมิติ ช่วยปรับการจัดวางให้ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพและยกระดับคุณภาพงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ [17]

2.1.4 การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Theory)

การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มหรือลดค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เช่น การเพิ่มผลผลิต การลดต้นทุน หรือการลดเวลา ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการตัดสินใจเชิงปริมาณในงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม [18] สำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ นิยมใช้การหาค่าเหมาะที่สุดหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization: MOO) เพื่อค้นหาชุดคำตอบที่เหมาะสมภายใต้ความขัดแย้งของวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยผลลัพธ์มักแสดงในรูปของ Pareto Front [19], [20]

2.1.5 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Linear Programming: LP) and (Mixed-Integer Linear Programming: MIP)

โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่สำคัญในการตัดสินใจเชิงปริมาณ เนื่องจากสามารถสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานอุตสาหกรรมและการออกแบบงาน ฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์และข้อจำกัดของ LP ถูกนิยามให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ (1) ส่วนข้อจำกัดเชิงเส้นเขียนได้ในสมการที่ (2)

$$\max/\min Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

โดยที่

Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

c_j = ค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าน้ำหนักของตัวแปรตัดสินใจ

x_j ที่มีผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เมื่อ $j = 1, 2, \dots, n$

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable)

j = ดัชนีของตัวแปรการตัดสินใจ

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i \quad (2)$$

โดยที่

a_{ij} = สัมประสิทธิ์ของตัวแปร x_j ในข้อจำกัดที่ i

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ

b_i = ค่าด้านขวาของข้อจำกัด (Right-Hand Side)

i = ดัชนีของข้อจำกัด

j = ดัชนีของตัวแปรการตัดสินใจ

จากข้อจำกัดสามารถสะท้อนถึงข้อจำกัดในงานยศาสตร์ที่ทำในส่วนของ เวลา, จำนวนคนงาน, หรือทรัพยากรที่มีอยู่ จึงใช้วิธีแก้ปัญหาอย่าง Simplex Method และ Interior Point Method ที่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ขอบเขตที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ [18]

การขยาย LP เป็น MIP ใช้เมื่อบางตัวแปรต้องเป็นจำนวนเต็ม เช่น รอบการยกหรือจำนวนพนักงาน เพื่อจำลองสถานการณ์จริง โดยผสมตัวแปรจำนวนเต็มและตัวแปรจริงเข้าด้วยกัน ตัวอย่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ MIP แสดงดังสมการที่ (3)

$$Z = \sum_{j=1}^n c_jx_j \quad (3)$$

โดยที่

Z = ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$\sum_{j=1}^n c_j x_j$ = ผลรวมเชิงเส้น (Linear Sum)

x_j = ตัวแปรการตัดสินใจ

c_j = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

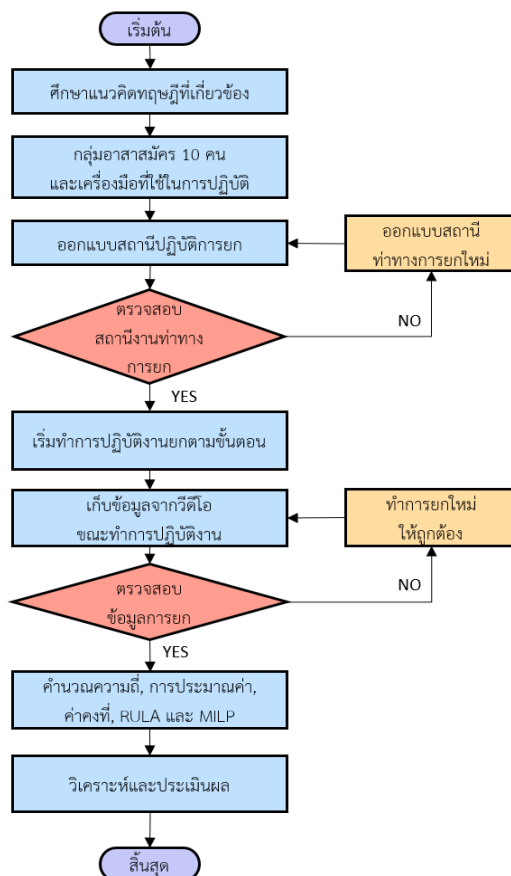
สำหรับแบบจำลอง MIP มีข้อกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจบางส่วนหรือทั้งหมดเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งเป็นลักษณะที่แตกต่างจากแบบจำลอง LP ที่อนุญาตให้ตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนจริง

2.1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรมเชิงเส้นในงานการยศาสตร์

งานวิจัยช่วง 5 ปีที่ผ่านมาแสดงการบูรณาการ Optimization กับ Ergonomics ในอุตสาหกรรม โดยใช้ LP, MIP และ MILP เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดเวลา และลดความเสี่ยงทางการยศาสตร์ ร่วมกับการใช้ Computer Vision และ biomechanical models เพื่อวิเคราะห์ท่าทางและลด WMSDs [21],[22] รวมถึงการประเมินการแทรกแซงทางการยศาสตร์ในงานจัดการวัสดุที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ [23] สะท้อนการบูรณาการเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเพื่อออกแบบงานที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 แนวคิดและกรอบการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ใช้แบบจำลอง MILP วิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพท่าทางการยกของผู้ปฏิบัติงาน โดยประเมินความเสี่ยงด้วยคะแนน RULA และจัดสรรภาระงานภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาและความปลอดภัย กำหนดท่าทางและน้ำหนักตามมาตรฐาน [24] พร้อมแบ่งช่วงการยกเพื่อติดตามเวลาและประเมินความเสี่ยงอย่างละเอียด โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทดลองนี้ดำเนินการกับผู้ทดลองจำนวน 10 คน ซึ่งคัดเลือกอาสาสมัครแบบสุ่ม โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้ทดลองแต่ละคนได้รับมอบหมายให้ทำการยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 10 กิโลกรัม เพื่อแทนภาระงานยกในระดับมาตรฐานการยกที่พบได้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป โดยสถานียานยกถูกออกแบบให้อยู่ในห้องปฏิบัติการ ให้เกิดความปลอดภัยตามหลักเกณฑ์ด้านการยศาสตร์ [24] และมีการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการปฏิบัติงานจากท่ายืนยกอย่างชัดเจน อีกทั้งขนาดของวัตถุถูกควบคุมให้คงที่

ตลอดการทดลอง เพื่อให้ไม่ส่งผลต่อท่าทางการยกและผลการประเมิน RULA โดยแต่ละคนทำการยกทั้งหมด 3 รอบต่อคน โดยในการเคลื่อนไหวแต่ละรอบถูกแบ่งออกเป็นสี่ช่วงหลัก ช่วงแรกเป็นช่วงเตรียมตัว ผู้ทดลองยืนในตำแหน่งที่กำหนดเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการยกวัตถุ ช่วงต่อมาคือช่วงเริ่มยกจากพื้นถึงเข่า ผู้ทดลองย่อตัวลงโดยให้เข่าและหลังอยู่ในแนวตรงเพื่อยกวัตถุจากพื้นขึ้นไปถึงระดับเข่า หลังจากนั้นเป็นช่วงยกจากเข่าสูงขึ้นไปจนถึงระดับเอว ส่วนช่วงสุดท้ายคือการยกวัตถุจากระดับเอวไปยังจุดวางสุดท้าย พร้อมเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวและเวลา แล้วนำไปพิจารณาความเสี่ยง

ทางการยศาสตร์ด้วยคะแนน RULA เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์หาการจัดสรรภาระงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขั้นตอนในการยก แสดงดังรูปที่ 3

การยกเป็นแบบ full load ผู้ปฏิบัติงานทำทั้งหมด 3 รอบต่อคน โดยเก็บข้อมูลวิดีโอทุกครั้ง หลังเสร็จสิ้นงานวิจัยคัดเลือกเฟรมภาพสำคัญ 3 เฟรมต่อรอบ ได้แก่ ช่วงเริ่มยก ขณะยก และวางวัตถุ เพื่อนำมาวิเคราะห์ท่าทาง เวลาในการยก และประเมิน RULA ช่วยให้วิเคราะห์ภาระทางร่างกายและเปรียบเทียบท่าทางระหว่างรอบและผู้ปฏิบัติงานได้อย่างแม่นยำ โดยจะทำการคัดเลือกเฟรมภาพดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขั้นตอนการยกงานเข้าซ้อนแบบ full load (ก) ยืนในจุดเริ่มท่าทางปฏิบัติงานยก (ข) ย่อเข่าลงหลังตรงเริ่มยกที่ระดับพื้นถึงระดับเข่า (ค) การยกจากระดับเข่าถึงระดับเอว และ (ง) การยกจากระดับเอวไปยังจุดวางสุดท้าย



รูปที่ 4 การคัดเลือกเฟรมภาพสำหรับการวิเคราะห์ผล (ก) ท่าทางขณะยกที่ระดับเข่า (ข) ท่าทางการยกที่ระดับเอว และ (ค) ท่าทางการยกขณะเสร็จสิ้น

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บข้อมูลดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมสภาพแวดล้อมให้คงที่ โดยผู้ทดลองทำการยกวัตถุตามลำดับที่กำหนด และมีการบันทึกวิดีโอเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เวลาและท่าทางการปฏิบัติงาน ภายหลังการทดลอง จะดำเนินการวิเคราะห์วิดีโอโดยระบุจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละรอบการยก พร้อมบันทึกเวลาที่ใช้ในแต่ละรอบเป็นวินาที สำหรับการประเมินคะแนน RULA และจะพิจารณาท่าทางการทำงานจากวิดีโอและประเมินมุมของอวัยวะส่วนต่าง ๆ โดยอ้างอิงช่วงมุมตามเกณฑ์ที่กำหนดในแบบประเมิน RULA [16] จากนั้นจึงคำนวณคะแนนความเสี่ยงของแต่ละรอบด้วยวิธีการคำนวณมือ และหาค่าเฉลี่ยเวลา และคะแนน RULA ต่อรอบการยกของผู้ทดลองแต่ละคน เพื่อนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง MILP

2.4 การกำหนดพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์

กำหนดเวลารวมของผู้ทดลองแต่ละคนจากผลรวมของเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วง และคำนวณภาระงานสะสมต่อรอบการยก แสดงสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$T_s = T_{s,1} + T_{s,2} + \dots + T_{s,i} \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{R_{s,1} \cdot T_{s,1} + R_{s,2} \cdot T_{s,2} + \dots + R_{s,i} \cdot T_{s,i}}{T_s} \quad (5)$$

โดยที่

ρ_s = ภาระงานเฉลี่ยต่อรอบของผู้ทดลอง

T_s = เวลารวมต่อรอบของผู้ทดลอง (วินาที)

$T_{s,i}$ = เวลาที่ใช้แต่ละช่วงการยกของผู้ทดลอง (วินาที)

R_s = คะแนน RULA รวมต่อรอบของผู้ทดลองลำดับ s

$R_{s,i}$ = คะแนน RULA ของผู้ทดลองลำดับที่ s ใน

ท่าทางที่ i

s = ลำดับผู้ทดลอง

i = ลำดับท่าทางของผู้ทดลอง

2.5 การประมาณภาระงาน

การทดลองมีจำนวนรอบจำกัด จึงประมาณสถานการณ์ทำงานต่อเนื่อง 10, 20 และ 30 นาที โดยไม่มีการหยุดพัก และใช้เวลารวมต่อรอบคำนวณจำนวนรอบสูงสุดของผู้ทดลองในแต่ละช่วง เพื่อวิเคราะห์การจัดสรรภาระงานตามสมการที่ 6

$$L_s = \left\lceil \frac{D}{T_s} \right\rceil, D = 600, 1200, 1800 \quad (6)$$

โดยที่

L_s = จำนวนการประมาณรอบที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา

D = เวลารวมของช่วงทดลองเป็นวินาที คือ 600

วินาทีสำหรับ 10 นาที, 1200 วินาทีสำหรับ 20 นาที

และ 1800 วินาทีสำหรับ 30 นาที

T_s = เวลารวมต่อรอบของผู้ทดลอง (วินาที)

2.6 การสร้างแบบจำลอง Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

ในการสร้างตัวแปรตัดสินใจในแบบจำลอง MILP ใช้วิธีแมนตรง เช่น Branch-and-Bound หรือฮิวริสติก แต่การศึกษานี้ใช้ตัวแก้ MILP มาตรฐาน โดยกำหนดตัวแปรแทนจำนวนครั้งการยกใน 10, 20 และ 30 นาที และกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดภาระงานยกทางกายศาสตร์รวมของกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน ดังสมการที่ 7

และมีข้อจำกัดของแบบจำลอง MILP ที่ประกอบไปด้วย ข้อจำกัดเวลา ดังสมการที่ 8-11 โดยสมการที่ 8 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 10 นาที, สมการที่ 9 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 20 นาที และ สมการที่ 10 ใช้สำหรับช่วงเวลายก 30 นาที

$$\text{Minimize } Z = \sum_{s=1}^{10} \rho_s \cdot L_s \quad (7)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 600, \forall s \text{ (10 min)} \quad (8)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 1200, \forall s \text{ (20 min)} \quad (9)$$

$$T_s \cdot L_s \leq 1800, \forall s \text{ (30 min)} \quad (10)$$

$$1 \leq L_s \leq L_s \text{ max}, \forall s \quad (11)$$

โดยที่

Minimize Z = ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\sum_{s=1}^{10} \rho_s \cdot L_s = \text{ผลรวมเชิงเส้น (Linear Sum)}$$

ρ_s = ภาระงานเฉลี่ยต่อรอบของผู้ทดลอง

L_s = จำนวนการประมานครอบที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา

$\forall s$ = ทุกสถานีงานต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขที่กำหนด

$L_s \text{ max}$ = จำนวนรอบการยกสูงสุด (Maximum number of lifting cycles)

L_s^* = จำนวนรอบการยกที่เหมาะสมที่สุด (Optimal number of lifting cycles)

Z_{opt} = ค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Optimal objective function value)

อีกทั้งยังกำหนด $L_s \geq 1$ เพื่อให้ผู้เข้าร่วมทุกคนมีภาระงานอย่างน้อย 1 รอบ นอกจากนี้ ได้พิจารณา 3 กรณีศึกษา ได้แก่ การลดภาระงานสะสมรวม (A) การกระจายภาระงานอย่างเป็นธรรม (B) และการกระจายภาระงานให้ใกล้เคียงกัน (C)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ทำโดยกำหนดพารามิเตอร์ T_s , ρ_s สร้างตัวแปร L_s และคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พร้อมข้อจำกัด การใช้ deterministic allocation ให้รอบการยกที่เหมาะสม L_s^* และค่า Z_{opt} ข้อมูล Manual RULA ถูกตรวจสอบข้อมูล Manual RULA เพื่อลดความคลาดเคลื่อน พร้อมวิเคราะห์ความไวของรอบการยกต่อ L_s^* และค่า Z_{opt} เพื่อประเมินความเสถียรของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองจริง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษานี้ใช้ MILP ร่วมกับ deterministic allocation เพื่อกำหนดจำนวนรอบการยกที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดเวลาและการยศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลจากผู้เข้าร่วม 10 คน ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของผู้ทดลอง

ผู้ทดลอง	T_s (วินาที/รอบ)	ρ_s
คนที่ 1	7.00	3.48
คนที่ 2	7.67	3.97
คนที่ 3	8.33	3.53
คนที่ 4	8.00	3.76
คนที่ 5	7.67	3.54
คนที่ 6	7.67	4.09
คนที่ 7	7.33	4.27
คนที่ 8	6.67	3.35
คนที่ 9	6.67	3.63
คนที่ 10	5.67	3.72

หลังจากได้ค่า T_s และ ρ_s ของผู้เข้าร่วมทั้งหมดแล้ว จึงคำนวณจำนวนรอบสูงสุดในแต่ละช่วงเวลาเพื่อจำกัดตัวแปร L_s ตามข้อจำกัดด้านเวลาแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนรอบสูงสุดที่ทำได้ของผู้ทดลอง

ผู้ทดลอง	10 นาที	20 นาที	30 นาที
คนที่ 1	85	171	257
คนที่ 2	78	156	234
คนที่ 3	72	144	216
คนที่ 4	75	150	225
คนที่ 5	78	156	234
คนที่ 6	78	156	234
คนที่ 7	81	162	245
คนที่ 8	90	180	270
คนที่ 9	90	180	270
คนที่ 10	105	210	317

จากตารางพบว่าจำนวนรอบสูงสุดเพิ่มขึ้นตามเวลา ผู้ที่มีค่า T_s ต่ำสามารถทำรอบได้มากกว่าผู้ที่มี T_s สูง การกระจายตัวสะท้อนความแตกต่างทางสมรรถนะ ทำให้ MILP จัดสรรภาระงานได้เหมาะสมและเป็นธรรม ต่อมาคำนวณด้วย deterministic

allocation ใน 3 กรณี ได้แก่ A ลดความเสี่ยงรวมสูงสุด , B กระจายงานแบบ Fairness ใกล้เคียงไม่เกิน L_s max, และ C กระจายเท่ากันตามค่าต่ำสุด ผลการคำนวณแบบจำลอง MILP ด้วยวิธี Deterministic allocation ทั้ง 3 กรณีแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลการจัดสรรภาระงานภายใต้ 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณี A (การลดภาระงานสะสมรวม) กรณี B (การจัดสรรภาระงานอย่างเป็นธรรม) และกรณี C (การจัดสรรภาระงานให้ใกล้เคียงกันระหว่างผู้ปฏิบัติงาน)

ผู้ทดลอง คนที่	ρ_s	ที่ 10 นาที (600 วินาที)			ที่ 20 นาที (1200 วินาที)			ที่ 30 นาที (1800 วินาที)		
		$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$	$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$	$L_s^*(A)$	$L_s^*(B)$	$L_s^*(C)$
คนที่ 1	3.48	1	83	72	1	166	144	1	250	216
คนที่ 2	3.97	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 3	3.53	1	72	72	1	144	144	1	216	216
คนที่ 4	3.76	1	75	72	1	150	144	1	225	216
คนที่ 5	3.54	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 6	4.09	1	78	72	1	156	144	1	234	216
คนที่ 7	4.27	1	81	72	1	162	144	1	245	216
คนที่ 8	3.35	90	83	72	180	166	144	270	250	216
คนที่ 9	3.63	1	83	72	1	166	144	1	250	216
คนที่ 10	3.72	1	83	72	1	166	144	1	250	216
$\Sigma \rho L$ (Zopt)		335.49	2963.77	2688.48	636.99	5927.54	5376.96	938.49	8914.03	8065.44

จากตารางที่ 4 การคำนวณแบบจำลอง MILP ด้วยวิธี Deterministic Allocation พบว่า กรณี A ลดความเสี่ยงรวมต่ำสุดแต่ไม่ยุติธรรม, กรณี B กระจายภาระอย่างยุติธรรมแต่ภาระรวมสูงขึ้น และกรณี C กระจายเท่ากันทุกคน มีความสมดุลและนำไปใช้ได้จริง

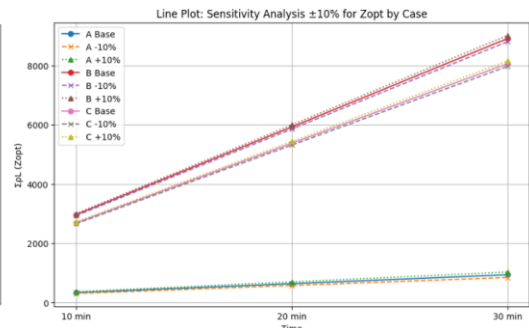
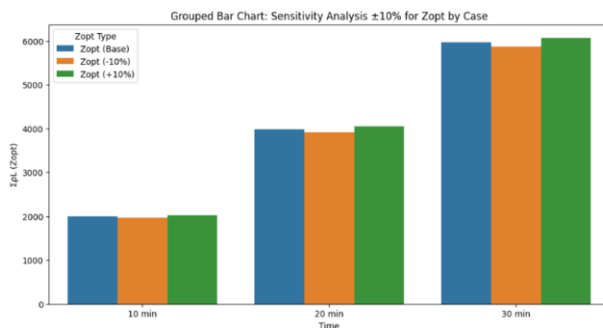
โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จำนวนรอบและค่าความเสี่ยงรวมเพิ่มตามลำดับ และเพื่อทดสอบความเสถียรของแบบจำลองต่อความคลาดเคลื่อน การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ถูกดำเนินการโดยปรับค่ารอบการยก $\pm 10\%$ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางสรุปการวิเคราะห์ความไวของโมเดล MILP (Sensitivity analysis $\pm 10\%$)

กรณี	ที่ 10 นาที			ที่ 20 นาที			ที่ 30 นาที		
	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%	Zopt -10%	Zopt เดิม	Zopt +10%
A	305.34	335.49	365.64	576.69	636.99	697.29	848.04	938.49	1028.94
B	2929.18	2963.77	2998.36	5858.37	5927.54	5996.71	8809.42	8914.03	9018.65
C	2657.74	2688.48	2719.22	5315.47	5376.96	5438.45	7973.21	8065.44	8157.67

ผลการวิเคราะห์ความไวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในช่วง $\pm 10\%$ ส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันแต่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของผลการจัดสรรภาระงาน สะท้อนให้เห็นถึงความคงทนของแบบจำลองต่อความไม่แน่นอนของข้อมูลนำเข้า ในมุมมองของการวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพ ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถตีความได้ว่าแบบจำลองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ในระดับต่ำภายใต้ช่วง

ที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ช่วงความคงตัวของสัมประสิทธิ์ (Objective Coefficient Range) การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ในข้อจำกัด (RHS Sensitivity) และค่า Shadow Price สำหรับข้อจำกัดต่าง ๆ ยังเป็นประเด็นที่สามารถศึกษาต่อยอดได้ในอนาคต โดยเฉพาะเมื่อใช้ตัวแก้ปัญหาที่รองรับการวิเคราะห์หลังการหาคำตอบ (Post-optimal Analysis) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ความไวของโมเดล MILP สำหรับ Zopt ทุกกรณี

4. สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลอง MILP ภายใต้แนวคิด Deterministic Allocation เพื่อจัดสรรภาระงานยกให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานจริง จากการทดลองกับผู้เข้าร่วม 10 คน พบว่าเวลารวมรอบ 7.17 วินาที และคะแนน RULA อยู่ระดับปานกลาง ข้อมูลนี้ใช้คำนวณการจัดสรรงานในสามกรณี: ลดภาระรวมสูงสุด (A), จัดสรรยุติธรรม (B) และกระจายภาระเท่ากัน (C) การศึกษาแสดงให้เห็นว่า MILP จัดสรรงานได้เป็นระบบ โดยกรณี A ลดภาระรวมสูงสุดแต่ไม่สมดุล กรณี C กระจายงานเท่า ๆ กันบริหารง่าย ส่วนกรณี B สมดุลทั้งประสิทธิภาพและความยุติธรรม ลดความเสี่ยงความล่าช้าและเพิ่มความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงาน แบบจำลองมีความเสถียรสูงจาก Sensitivity Analysis $\pm 10\%$ หากต้องการลดค่าภาระรวมทางการยศาสตร์ให้ต่ำที่สุดควรเลือกใช้กรณี A รองลงมาคือกรณี C และกรณี B ($A > C > B$)

> B) แต่หากต้องการให้การจัดสรรภาระงานเป็นไปอย่างเหมาะสมและยุติธรรมที่สุด ควรเลือกใช้กรณี B รองลงมาคือกรณี C และกรณี A ($B > C > A$) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในประเทศไทย มีการประเมินความเสี่ยงทางร่างกายของคนงานอุตสาหกรรมรีดขึ้นรูปพลาสติกหลักโดยใช้ RULA และ REBA และพบว่าหลายตำแหน่งงานอยู่ในระดับเสี่ยงที่ควรได้รับการปรับปรุงทันที [25] อีกทั้งยังมีการปรับปรุงวิธีการทำงานในขั้นตอนการกรอด้วยโดยใช้แบบประเมิน RULA เพื่อออกแบบเครื่องกรอด้วยแบบมอเตอร์ ผลลัพธ์หลังปรับแล้วคะแนน RULA ลดลงจนอยู่ในระดับที่ “ยอมรับได้” [26] การศึกษาในครั้งนี้จึงเติมเต็มช่องว่างและเป็นแนวทางด้านการจัดสรรงานเชิงตัวเลข (allocation) แทนการประเมินหรือปรับท่าทางเพียงอย่างเดียวในงานด้านการยศาสตร์ไทย

อีกทั้งงานวิจัยในต่างประเทศชาติ มีการเสนอโมเดล scheduling แบบหลายวัตถุประสงค์ (multi

objective) โดยรวมภาระทางยศาสตร์ (ergonomic risk) เข้ากับการจัดตารางบุคลากร [27] เกิดความสอดคล้องกับแนวคิดที่พัฒนาขึ้น การรวมปัจจัย ergonomics ในการกำหนดตารางงานช่วยลดความเสี่ยงของโรคกล้ามเนื้อโครงร่างในขณะที่รักษาประสิทธิภาพการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [27]

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กรณี A มีแนวโน้มเกิดการกระจุกตัวของภาระงาน ขณะที่กรณี B และ C ช่วยให้การกระจายภาระงานมีความสมดุลมากขึ้น หากต้องประยุกต์ใช้จริง อาจพิจารณาเพิ่มข้อจำกัดด้านความสมดุลของภาระงาน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในครั้งนี้สามารถเสนอแนวทางปฏิบัติ ในการจัดสรรงานยกแบบซ้ำ โดยไม่เพียงแต่ประเมินความเสี่ยงแต่ยังคำนึงถึงความเที่ยงธรรมและประสิทธิภาพการยก ซึ่งเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยไทยที่มุ่งการประเมินเพียงอย่างเดียว และสอดคล้องกับแนวโน้มสากลในการรวมปัจจัยทางกายศาสตร์กับแผนการดำเนินงานผ่านโมเดลคณิตศาสตร์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. C. H. Chan, G. B. Ross, A. L. Clouthier, S. L. Fischer, and R. B. Graham, "The role of machine learning in the primary prevention of work-related musculoskeletal disorders: A scoping review," *Applied Ergonomics*, vol. 98, 2022.
- [2] K. Wachirasiri and S. Taptagaporn, "Work Improvement to Reduce Fatigue and Postural Risk: A Case Study of Workers in a Joint Assembly Process," *Thai Journal of Ergonomics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [3] K. Sahunalu and P. Sakunkoo, "Ergonomic Risk Assessment by RULA in Drinking Water Plants Staffs in Chalomephakiat District, Buriram Province," *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, vol. 20, no. 3, pp. 137–144, 2020.
- [4] N. Laowanich, P. Meepradit, and T. Yingratanasuk, "Applying Participatory Ergonomics to Improve Working Condition for Reducing Shoulder Risk among Supporting Personnel in a Hospital, Chonburi Province," *Journal of Safety and Health*, vol. 15, no. 2, 2022.
- [5] N. Singchai, "The effectiveness of ergonomic workstation improvements on stone setters in one jewelry manufacture," M.S. thesis, Dept. Public Health, Thammasat Univ., Pathum Thani, Thailand, 2022.
- [6] R. Zaman, A. Arefeen, J. Quarnstrom, S. Barman, J. Yang, and Y. Xiang, "Optimization-based biomechanical lifting models for manual material handling: A comprehensive review," *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering Part H Journal of Engineering in Medicine*, vol. 236, no. 9, pp. 1273–1287, 2022.
- [7] T. Prunet, N. Absi, V. Borodin, and D. Cattaruzza "Optimization of human-aware logistics and manufacturing systems: A survey on Human-Aware Models," *Euro Journal on Transportation and Logistics*, vol. 13, 2024.

- [8] C. Gregg, V. V. Visconti, M. Albanese, B. Gasperini, A. C. C. Prezioso, B. Persechino, S. Iavicoli, E. Gasbarra, R. Iundusi, and U. Tarantino, "Work-Related Musculoskeletal Disorders: A systematic review," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 13, no. 13, 2024.
- [9] A. Vuttikun, C. Chanprasit, and T. Kaewthummanukul, "Ergonomic Factors and Musculoskeletal Disorders Among Bamboo Handicraft Workers," *Nursing Journal CMU*, vol. 47, no. 2, pp. 37–49, 2020.
- [10] F. Liu, Y. Duan, Z. Wang, R. Ling, Q. Xu, J. Sun, Y. Liu, Y. Yang, G. Li, H. Zhang, D. Li, R. Wang, J. Liu, X. Geng, W. Xiong, Z. Li, N. Jia, and C. Wu, "Mixed adverse ergonomic factors exposure in relation to work-related musculoskeletal disorders: A multicenter cross-sectional study of Chinese medical personnel," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [11] National Institute for Occupational Safety and Health, "Revised NIOSH lifting equation," [Online]. <https://www.cdc.gov/niosh/ergonomics/about/RNLE.html> [Accessed: Mar. 1, 2024].
- [12] N. Yodyingnakchaiyakron, "Prevalence and Work-Related Musculoskeletal Discomfort Related Factors Among Thai Gas Employees in Samut Sakhon Province," *EAU Heritage Journal Science and Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 213–225, 2020.
- [13] L. McAtamney and E. N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work related upper limb disorders," *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993.
- [14] S. Kulwong, "Occupational Back Pain: NIOSH Assessment Tool for Prevention," *The Public Health Journal of Burapha University*, vol. 3, no. 2, pp. 32–45, 2008.
- [15] T. R. Waters, V. Putz-Anderson, and A. Garg, *Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation*. Cincinnati, OH, USA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 94-110, 1994, rev. Sep. 2021, doi: 10.26616/NIOSH PUB94110 revised 092021.
- [16] EST Thailand, "Rapid Upper Body Assessment (RULA) [Assessment of Sitting Posture at Work]," [Online]. Available: <https://sites.google.com/est.or.th/est/home> [Accessed: Sep. 5, 2025].
- [17] A. K. Saha, M. A. Jahin, M. Rafiquzzaman, and M. F. Mridha, "Ergonomic design of computer laboratory furniture: Mismatch analysis utilizing anthropometric data of university students," *Heliyon*, vol. 10, no. 14, 2024.
- [18] H. V. Mahmoodian, H. Charkhgard, and Y. Zhang, "Multi-objective optimization based algorithms for solving mixed integer linear minimum multiplicative programming problems," *Computers & Operations Research*, vol. 128, 2021.

- [19] A. Jaber, R. Younes, P. Lafon, and J. Khoder, "A review on multi-objective mixed-integer non-linear optimization programming methods," *Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 1961–1979, 2024.
- [20] I. Pappas, S. Avraamidou, J. Katz, B. Burnak, B. Beykal, M. Türkay, and E. N. Pistikopoulos, "Multiobjective Optimization of Mixed-Integer Linear Programming Problems: A Multiparametric Optimization Approach," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 23, no. 60, 2021.
- [21] M. Rinaldi, M. Fera, E. Bottani, and E. H. Grosse, "Workforce scheduling incorporating worker skills and ergonomic constraints," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 168, 2022.
- [22] R. A. Pozo and J. B. Valhondo, "Impact of limiting the ergonomic risk on the economic and productive efficiency of an assembly line," *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 1–2, pp. 122–140, 2023.
- [23] S. J. Wurzelbacher, M. P. Lampl, S. J. Bertke, and C. Y. Tseng, "The effectiveness of ergonomic interventions in material handling operations," *Applied Ergonomics*, vol. 87, 2020.
- [24] Thailand Institute of Occupational Safety and Health (Public Organization), Ergonomics Standard on Manual Materials Handling (SHS 302:2018), [Online]. Available: <https://www.tosh.or.th/>. [Accessed: Sep. 5, 2025].
- [25] S. Huaychan and S. Chaiklieng, "Ergonomic Risk Assessment of Work-Related Musculoskeletal Disorders among Employees in the Steel Roll Roof Forming Industry, Thailand," *KKU Journal for Public Health Research*, vol. 12, no. 2, pp. 85–90, 2019.
- [26] S. Klomsae and R. Roonreangjai, "Ergonomics Assessment in Improving the Work for the Winding Process," *Journal of Technology and Innovation Uttaradit Rajabhat University*, vol. 2, no. 2, pp. 11–22, 2019.
- [27] E. H. Özder, "A Holistic Model for Ergonomic and Sustainable Personnel Scheduling in Urban Transportation," *Processes*, vol. 13, no. 3, 2025.

ผลของการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลทรายต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของมะพร้าวแก้วภายใต้สภาวะดัดแปลง

เชาวลิต อุปฐาก นีอร ดาวเจริญพร และ ธนภพ โสตรโยม*

คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรชัยยบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

รับบทความ 9 มีนาคม 2569 แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 24 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสูตรพื้นฐาน กรรมวิธีการผลิต และวิเคราะห์คุณสมบัติทางประสาทสัมผัส เคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว รวมถึงการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลบางส่วนในสูตรผลิตภัณฑ์ ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า สูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้วได้รับคะแนนความชอบ ด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 8.15 ขณะที่สูตรที่ใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลร้อยละ 30 ได้รับการยอมรับจากผู้ชิมมากที่สุดในทุกด้าน ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนเฉลี่ยสูงสุด 8.59 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพพบว่า สูตรที่ใช้อิทธิพลร้อยละ 30 มีความชื้นต่ำที่สุดร้อยละ 2.08 และมีปริมาณเถ้าสูงที่สุดร้อยละ 0.86 ขณะที่สูตรที่ใช้อิทธิพลร้อยละ 30 มีปริมาณไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 11.32 ร้อยละ 82.99 และร้อยละ 2.16 ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าสูตรพื้นฐานมีค่าความสว่าง (L^*) สูงที่สุด ส่วนค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) สูงที่สุดในสูตรที่ใช้อิทธิพลร้อยละ 30 การตรวจสอบคุณภาพทางจุลินทรีย์พบว่า มะพร้าวแก้วที่เก็บรักษาในสภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100% มีอายุการเก็บรักษานานที่สุด 12 วัน ขณะที่การเก็บในสภาวะสุญญากาศมีอายุการเก็บรักษาน้อยที่สุด 3 วัน และตัวอย่างทั้งหมดไม่พบปริมาณ *Staphylococcus aureus* เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

คำสำคัญ : มะพร้าวแก้ว; อิทธิพล; การเก็บรักษา; ภาวะดัดแปลง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2665 3777, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: thanapop.s@rmutp.ac.th

Effect of Erythritol Substitution for Sucrose on Quality and Shelf Life of Coconut Candy under Modified Atmosphere Packaging

Chaowalit Auppathak Nion Daocharoenporn and Thanapop Soteyome*

Faculty of Home Economics Technology Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
168 Sri Ayutthaya Road, Vachira Phayaban Dusit, Bangkok, 10300

Received 9 March 2026; Revised 12 June 2026; Accepted 24 June 2026

Abstract

This research aimed to investigate the basic formulation, production process, and to evaluate the sensory, chemical, physical, and microbiological qualities of coconut candy, including the partial replacement of sugar with erythritol. Sensory evaluation results indicated that the control formulation exhibited high overall acceptability in terms of aroma, taste, texture, and overall liking, with a mean score of 8.15. Among the erythritol-substituted formulations, the sample containing 30% erythritol replacement received the highest consumer acceptance for appearance, color, aroma, taste, texture, and overall liking, with a mean score of 8.59. Chemical and physical analyses revealed that the formulation with 30% erythritol replacement had the lowest moisture content (2.08%) and the highest ash content (0.86%). The formulation containing 30% erythritol replacement exhibited the highest fat, carbohydrate, and protein contents, at 11.32%, 82.99%, and 2.16%, respectively. Regarding color characteristics, the control formulation showed the highest lightness value (L^*), while the formulation with 30% erythritol replacement presented the highest redness (a^*) and yellowness (b^*) values. Microbiological analysis demonstrated that coconut stored under 100% carbon dioxide modified atmosphere had the longest shelf life of 12 days, whereas vacuum-packed samples exhibited the shortest shelf life of 3 days. Total viable counts exceeded the acceptable limit on day 13 for carbon dioxide storage and on day 4 for vacuum storage. However, *Staphylococcus aureus* levels in all samples remained below 100 CFU/g, in accordance with the standards established by the Department of Medical Sciences.

Keywords : Coconut candy; Erythritol; Shelf life; Modified state

* Corresponding Author. Tel.: +66 2665 3777, E-mail Address: thanapop.s@rmutp.ac.th

1. บทนำ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้วเพื่อสุขภาพ และส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชน ภายใต้โครงการใหญ่ การสร้างนวัตกรรมและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์หนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) [1], [2] โดยชนที่ต้องการศึกษาค้นคว้า วิจัย และกลายมาเป็นขอบเขตการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ มะพร้าวแก้ว จำเป็นต้องคิดค้นสูตรและเทคนิคในการผลิต การกวน การผสม การให้ความร้อน ระยะเวลา อุณหภูมิ และปัจจัยอื่น แต่ทั้งนี้ยังคงอยู่บนหลักการที่ต้องลดความหวานและใช้สารให้ความหวานทดแทนแบบไม่ให้พลังงาน และเป็นโทษแก่ร่างกาย ในการทำวิจัยสร้างนวัตกรรมต่อยอดในครั้งนี้

มะพร้าว (*Cocos nucifera* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยมาอย่างยาวนาน สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ทั้งในรูปแบบอาหาร เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์แปรรูปต่าง ๆ โดยเฉพาะการแปรรูปเนื้อมะพร้าวที่กินเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานพื้นบ้าน ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรและสร้างรายได้แก่ชุมชนท้องถิ่น [3] หนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมคือ มะพร้าวแก้ว ซึ่งเป็นขนมหวานที่ผลิตจากเนื้อมะพร้าวที่กินนำมาเคี้ยวร่วมกับน้ำตาลจนเกิดการซึมผ่านของน้ำเชื่อมเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ และเกิดผลึกน้ำตาลเคลือบบริเวณผิวภายนอก ทำให้มีรสชาติหวาน หอม และสามารถเก็บรักษาได้นานกว่ามะพร้าวสด มะพร้าวแก้วถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่สะท้อนภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปอาหาร โดยใช้วัตถุดิบที่หาได้ในชุมชน เช่น มะพร้าว น้ำตาลมะพร้าว หรือน้ำตาลทราย ช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ทรัพยากรทางการเกษตรและส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชน อย่างไรก็ตาม สูตรการผลิตแบบดั้งเดิมมักใช้น้ำตาลในปริมาณค่อนข้างสูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีพลังงานสูง และอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-Communicable Diseases; NCDs) เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวานชนิดที่ 2 และโรคหัวใจและหลอดเลือด

หากบริโภคในปริมาณมากเป็นประจำ [4] องค์การอนามัยโลก (WHO) แนะนำให้จำกัดการบริโภคน้ำตาลอิสระ (Free Sugars) ไม่เกินร้อยละ 10 ของพลังงานที่ได้รับต่อวัน และหากลดลงเหลือไม่เกินร้อยละ 5 จะส่งผลดีต่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการลดความเสี่ยงต่อโรคฟันผุและโรคอ้วน[5]ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่มีปริมาณน้ำตาลลดลงจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน

อิริทริทอล (Erythritol) เป็นสารให้ความหวานในกลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์ (Polyol) ที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหาร โดยผลิตจากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตด้วยจุลินทรีย์ มีความหวานประมาณร้อยละ 60-80 ของน้ำตาลทราย ให้พลังงานต่ำมาก และไม่ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดในระดับเดียวกับน้ำตาลซูโครส [6] นอกจากนี้ อิริทริทอลยังมีคุณสมบัติทนความร้อน ไม่ก่อให้เกิดฟันผุ และได้รับการประเมินด้านความปลอดภัยจากหน่วยงานด้านความปลอดภัยอาหารของสหภาพยุโรป (European Food Safety Authority; EFSA) ว่าสามารถใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารได้อย่างปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตาม น้ำตาลไม่ได้มีบทบาทเพียงให้ความหวานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส สี ความชื้น และการเกิดผลึกของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว ดังนั้น การใช้อิริทริทอลทดแทนน้ำตาลอาจส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี มีปริมาณน้ำตาลลดลง และยังคงเอกลักษณ์ของมะพร้าวแก้วไว้ได้ อันจะเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุดิบท้องถิ่นและตอบสนองต่อแนวโน้มการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพในปัจจุบัน

ทีมนักวิจัยคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร เห็นความสำคัญของความเป็นมาและภูมิปัญญาของชุมชนในการสร้างสรรค์และพัฒนา มะพร้าวแก้ว เป็นตัวอย่างที่ดีของการสร้างมูลค่าเพิ่ม

ให้กับผลิตภัณฑ์ จึงได้ดำเนินการศึกษาการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลบางส่วน เพื่อหาแนวทางการพัฒนามะพร้าวแก้วเพื่อสุขภาพและส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชนต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

2.1.1. วัตถุดิบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

- (1) มะพร้าวพื้นทีกชุดเส้น
- (2) น้ำตาลทราย
- (3) น้ำลอยดอกมะลิ
- (4) อิริทริทอล

2.1.2. อุปกรณ์ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์

- (1) เครื่องปั่น ยี่ห้อ philps รุ่น HR2115/02
- (2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Nagata รุ่น Fath-12
- (3) อ่างผสมสแตนเลส
- (4) หม้อสแตนเลส
- (5) กระทะทองเหลือง
- (6) พายไม้
- (7) เทอร์โมมิเตอร์
- (8) เตาอบ ยี่ห้อ Hoouno รุ่น C1.06z
- (9) หม้อล้งถึง
- (10) ผ้าขาวบาง

2.1.3. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ทางกายภาพ

- (1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น GT 4100 ยี่ห้อ OHAUS ประเทศ สวิสเซอร์แลนด์
- (2) เครื่องวัดค่าสี เครื่องหมายการค้า Minolta รุ่น CM – 3500 d โดยระบบ Hunter Lab เพื่อวัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าสี a^* และ b^* Made in Japan

2.1.4. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ทางเคมี

- (1) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น FD 115 ยี่ห้อ Binder ประเทศเยอรมัน
- (2) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น GT 4100 ยี่ห้อ OHAUS ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- (3) เครื่องแก้ว (ได้แก่ ปีกเกอร์ แท่งแก้ว ปิเปต บิวเรตพร้อมขาตั้ง ฟลาสก์ ขวดปรับปริมาตร หลอดทดลอง กระบอกตวง กรวยกรอง เป็นต้น)
- (4) กระดาษกรอง Whatman No.1 และ No.4 ของบริษัท Whatman Internationalประเทศอังกฤษ
- (5) ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture cans) โดคูดความชื้น (Desiccator)
- (6) เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนแบบ Kjeldahl รุ่น Vapodest 20 ยี่ห้อ Gerhardt ประเทศเยอรมัน
- (7) เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน รุ่น SER 148 ยี่ห้อ VELP SCIENTIFICA ประเทศอิตาลี
- (8) เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร ยี่ห้อ VELP SCIENTIFICA ประเทศอิตาลี
- (9) เตาเผา ยี่ห้อ Lenton ประเทศอังกฤษ

2.1.5. อุปกรณ์ในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส แบบประเมินทางประสาทสัมผัส 9 - Point Hedonic Scale

2.2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.2.1. เพื่อศึกษาสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว

ศึกษาข้อมูลและสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว ทั้ง 4 สูตร โดยการทดลองครั้งนี้ได้นำการศึกษาตามมาตรฐานมาพัฒนาตำรับโดยการศึกษาปริมาณการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอิริทริทอลทดแทนน้ำตาล ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) นำไปประเมินคุณภาพทาง

ประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสระดับห้องปฏิบัติการที่มีความคล้ายคลึงกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์[7], [8] จำนวน 30 คน ซึ่งเป็นอาจารย์สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ และสาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร ทำการเสิร์ฟตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลงในถ้วยพลาสติกสีขาว ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ และติดรหัสหมายเลข 3 ตัว ที่ได้จากการสุ่มระหว่างการทดสอบแต่ละตัวอย่างมีการล้างปากด้วยน้ำสะอาด คุณลักษณะที่ทำการทดสอบการยอมรับ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบรวม ด้วยวิธีการทดสอบการยอมรับแบบ 9-Point Hedonic Scale

2.2.2. เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตมะพร้าวแก้ว

ศึกษากรรมวิธีการผลิตมะพร้าวแก้วจากสูตรมาตรฐานที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลเอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และภูมิปัญญาท้องถิ่น เพื่อนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบสำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดำเนินการโดยใช้ผู้ประเมินแบบไม่ผ่านการฝึกฝน (Untrained Panelists) จำนวน 30 คน ซึ่งเป็นอาจารย์จากสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ และสาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร โดยทำการประเมินการยอมรับของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้วที่พัฒนาขึ้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ถูกบรรจุในถ้วยพลาสติกสีขาวและปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นติดรหัสตัวอย่างแบบสุ่มด้วยตัวเลข 3 หลัก (Three-Digit Random Code) เพื่อป้องกันอคติในการประเมิน ผู้ประเมินจะได้รับตัวอย่างที่ละตัวอย่าง และล้างปากด้วยน้ำสะอาดระหว่างการทดสอบแต่ละตัวอย่าง เพื่อลดผลกระทบจากรสชาติหรือกลิ่นที่ตกค้างจากตัวอย่างก่อนหน้าการทดสอบ

ดำเนินการโดยใช้วิธีการทดสอบการยอมรับ (Acceptance Test) ด้วยมาตรวัดความชอบแบบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) [9] โดยประเมินคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ (Appearance) สี (Color) กลิ่น (Odor) รสชาติ (Taste) กลิ่นรส (Flavor) เนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall Acceptability) ด้วยวิธีการทดสอบการยอมรับแบบ 9-Point Hedonic Scale

2.2.3. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของมะพร้าวแก้ว

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของมะพร้าวแก้ว ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างตามวิธีการของ AOAC (2000) [9], [10] ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า กากใยและคาร์โบไฮเดรต ทางกายภาพ ค่าสี โดยการเตรียมตัวอย่างมะพร้าวแก้วโดยสภาวะดัดแปรที่มีอายุการเก็บรักษานานที่สุด นำตัวอย่างมาบด จากนั้นนำมาตรวจวัดค่าสี โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d โดยวัดการผ่านของแสง (Transmittance) ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ครั้ง ค่าที่ทำการวัด ได้แก่ ค่าสี L^* (ค่าความสว่างมีค่า 0 ถึง 100 โดย 0 หมายถึง วัตถุที่มีความมืดสีดำ 100 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่างสีขาว) a^* (+ หมายถึง วัตถุมีสีแดง, - หมายถึง วัตถุมีสีเขียว) และ b^* (+ หมายถึง วัตถุมีสีเหลือง, - หมายถึง วัตถุมีสีน้ำเงิน) โดยตัวอย่างมาวิเคราะห์หาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดตามวิธี Standard Plate Count (SPC) (AOAC, 1984) [11]

2.2.4. เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว

ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว [12] การศึกษาบรรจุภัณฑ์ร่วมกับสภาวะดัดแปลงบรรยากาศที่เหมาะสมในการเก็บรักษาขนมไทยจะทำการศึกษาโดยนำมะพร้าวแก้วโดยสภาวะดัดแปรที่มี

อายุการเก็บรักษานานที่สุด ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่า pH meter Satorius AQ รุ่น PB-10 โดยการทำการทดสอบทุก ๆ ค่าวัด 3 ซ้ำ จากนั้นหาค่าเฉลี่ย [13]

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว

ศึกษาข้อมูลและสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสระดับห้องปฏิบัติการที่มีความคล้อยคลึงกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ จำนวน 30 คน ซึ่งเป็นอาจารย์สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ และสาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร ทำการเสิร์ฟตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลงในถ้วยพลาสติกสีขาว ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ และติดรหัสหมายเลข 3 ตัว ที่ได้จากการสุ่มระหว่างการทดสอบแต่ละตัวอย่างจะมีการล้างปากด้วยน้ำสะอาด คุณลักษณะที่ทำการทดสอบการยอมรับ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และ

ความชอบรวม ด้วยวิธีการทดสอบการยอมรับแบบ 9-Point Hedonic Scale [14] การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี (Duncan's New Multiple Range Test, DMRT)

ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว จำนวน 4 สูตร ดังตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย และค่าความแตกต่างของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว จำนวน 4 สูตร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้ว จำนวน 4 สูตร

วัตถุดิบ	ปริมาณวัตถุดิบ (กรัม)			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
มะพร้าว ทึนทึกขูด	250	500	1000	200
น้ำตาล	250	190	600	180
ทราย				
น้ำลอย ดอกมะลิ	-	-	-	80

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย และค่าความแตกต่างของคุณภาพทางประสาทสัมผัส ของสูตรพื้นฐานมะพร้าวแก้ว จำนวน 4 สูตร

คุณภาพทาง ประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ย และค่าความแตกต่าง			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
ลักษณะปรากฏ ^{NS}	7.85 ± 0.77	8.20 ± 0.59	7.76 ± 0.65	7.72 ± 0.69
สี ^{NS}	7.84 ± 0.69	8.22 ± 0.60	8.22 ± 0.67	7.73 ± 0.60
กลิ่น ^{NS}	7.67 ± 0.66	7.68 ± 0.70	7.72 ± 0.68	7.96 ± 0.80
รสชาติ	7.45 ± 0.77 ^b	7.72 ± 0.74 ^{ab}	7.71 ± 0.74 ^{ab}	8.18 ± 0.77 ^a
เนื้อสัมผัส ^{NS}	7.70 ± 0.59	7.81 ± 0.51	7.89 ± 0.74	7.90 ± 0.76
ความชอบโดยรวม ^{NS}	7.81 ± 0.67	7.89 ± 0.71	7.90 ± 0.54	8.15 ± 0.29

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05NS หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Not Significant) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าสูตรพื้นฐานของมะพร้าวแก้วสูตรที่ 4 ได้รับคะแนนการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมมากที่สุด โดยมีค่าความชอบในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนเฉลี่ย 7.72 7.73 7.96 8.18 7.90 และ 8.15 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ พบว่าในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ส่วนด้านรสชาติ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ดังนั้นผู้ศึกษาได้เลือกสูตรที่ 4 เป็นสูตรพื้นฐานในการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอิทธิพลทดแทนน้ำตาลในการผลิตมะพร้าวแก้วในการทดลองครั้งต่อไป

3.2 ผลการศึกษากิจกรรมวิธีการผลิตมะพร้าวแก้ว

การทดลองครั้งนี้ได้นำการศึกษาตำรับมาตรฐานมาพัฒนาตำรับโดยการศึกษาปริมาณการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอิทธิพลทดแทนน้ำตาล [15] ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ การวางแผนการทดลองใช้แบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) [16] โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการทดสอบ

การยอมรับแบบ 9-Point Hedonic Scale [17] ใช้ผู้ประเมินแบบไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 40 คน ประเมินคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งเป็นอาจารย์สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ และสาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านอาหาร

ผลการศึกษาการรวมวิธีการผลิตมะพร้าวแก้วที่แตกต่างกัน 4 ร้อยละ คือ 0 10 20 และ 30% ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณที่เหมาะสมอิทธิพลทดแทนน้ำตาลบางส่วนในการผลิตมะพร้าวแก้ว

วัตถุดิบ	ปริมาณวัตถุดิบ (กรัม)			
	สูตรที่ 1 (0%)	สูตรที่ 2 (10%)	สูตรที่ 3 (20%)	สูตรที่ 4 (30%)
มะพร้าว	200	200	200	200
พื้นที่กึ่งชุด				
น้ำตาลทราย	180	180	180	180
อิทธิพล	-	18	35	54
น้ำตาลดอก	80	80	80	80
มะลิ				

ตารางที่ 4 แสดงค่าคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตมะพร้าวแก้วอิทธิพลทดแทนน้ำตาล จำนวน 4 สูตร

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ปริมาณการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลในส่วนผสมบางส่วนของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว			
	สูตรพื้นฐาน (0%)	สูตรที่ 1 (10%)	สูตรที่ 2 (20%)	สูตรที่ 3 (30%)
ลักษณะปรากฏ	7.68±0.75 ^b	7.87±0.50 ^b	8.51±0.62 ^a	7.72±0.58 ^b
สี	7.55±0.70 ^b	7.59±0.68 ^b	8.28±0.72 ^a	7.69±0.43 ^b
กลิ่น	7.88±0.55 ^b	7.56±0.32 ^b	8.49±0.52 ^a	7.58±0.65 ^b
รสชาติ	7.40±0.78 ^b	7.76±0.40 ^b	8.56±0.64 ^a	7.57±0.54 ^b
เนื้อสัมผัส	7.55±0.65 ^b	7.63±0.68 ^b	8.73±0.75 ^a	7.59±0.82 ^b
ความชอบโดยรวม	7.65±0.61 ^b	7.57±0.85 ^b	8.59±0.34 ^a	7.56±0.66 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนเดียวกันที่มีอักษรเหมือนกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 4 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของปริมาณการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลในส่วนผสมบางส่วนของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้วที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0 10 20 และ 30% เมื่อนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ปริมาณการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาล 30% ผู้ชิมให้การยอมรับมากที่สุดในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ย 8.51 8.28 8.49 8.56 8.73 และ 8.59 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่า ในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.3 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และจุลินทรีย์ของมะพร้าวแก้ว

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพทางกายภาพวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปจากมะพร้าวจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า โยอาหารหยาบ และ

คาร์โบไฮเดรต ตามวิธีมาตรฐานของ รายงานผลในรูปแบบของร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง ยกเว้นปริมาณความชื้นซึ่งรายงานในรูปแบบของร้อยละโดยน้ำหนักเปียก ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water Activity; Aw) [18] ถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินความพร้อมของน้ำอิสระที่ส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ขณะที่คุณภาพทางกายภาพด้านสีถูกวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE Lab* โดยรายงานค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้วพบว่า คุณภาพทางเคมีมะพร้าวแก้วที่มีค่ามากที่สุด ดังนี้ สูตรที่ 3 (30%) กรัม ความชื้นร้อยละ 2.08 สูตรที่ 2 (20%) ไขมันร้อยละ 11.32 สูตรที่ 2 (20%) คาร์โบไฮเดรตละ 82.99 กรัม สูตรที่ 3 (30%) เถ้าร้อยละ 0.86 สูตรที่ 2 (20%) โปรตีนร้อยละ 2.16 ส่วนคุณภาพทางกายภาพพบว่า ความสว่าง (L^*) สูตรที่ 1 (10%) กรัม มีค่ามากที่สุด 57.25 ค่าสีแดง (a^*) และ ค่าสีเหลือง (b^*) สูตรที่ 2 (20%) กรัม มีค่ามากที่สุด 11.95 และ 27.48 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางกายภาพของการศึกษาปริมาณที่เหมาะสม ของการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว

คุณภาพทางเคมี / กายภาพ	สูตรที่ 1 (10%) (กรัม)	สูตรที่ 2 (20%) (กรัม)	สูตรที่ 3 (30%) (กรัม)
คุณภาพทางเคมี			
ความชื้น	2.45+0.84 ^b	2.01+0.79 ^a	2.08+0.92 ^a
ไขมัน	10.83+0.91 ^a	11.32+0.93 ^b	10.10+0.82 ^a
คาร์โบไฮเดรต	80.70+0.91 ^a	82.99+0.86 ^b	80.70+0.91 ^a
เถ้า	0.54+0.85 ^a	0.62+0.91 ^a	0.86+0.96 ^b
โปรตีน	2.86+0.76 ^b	2.16+0.78 ^b	1.90+0.93 ^a
คุณภาพทางกายภาพ			
ความสว่าง (L^*)	57.25+1.74 ^a	44.11+0.11 ^b	44.75+1.06 ^b
ค่าสีแดง (a^*)	10.94+0.64 ^b	11.95+0.21 ^a	11.86+0.19 ^a
ค่าสีเหลือง (b^*)	20.78+0.90 ^b	27.48+0.21 ^a	27.08+0.30 ^a

3.4 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้ว

ในการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติด้านจุลินทรีย์ โดยการใช้การตรวจวิเคราะห์ Total Plate Count และปริมาณ *S.aureus* โดยศึกษาจำนวนวันที่เก็บรักษาได้นานที่สุด ซึ่งจะนับเชื้อจุลินทรีย์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ต้องมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^{-6} และปริมาณ *S.aureus* ไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ซึ่งผลทดลองแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 6 แสดงผลของการบรรจุขนมชั้นภายใต้สภาพปรับบรรยากาศต่อจำนวนจุลินทรีย์ที่วิเคราะห์

สภาวะการเก็บ	อายุการเก็บรักษา (วัน)	ผลการวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์	
		จุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	<i>S.aureus</i> (โคโลนี/กรัม)
สุญญากาศ (Vacuum)	0	1.4×10^3	ND
	1	3.3×10^3	< 100
	2	5.2×10^3	< 100
	3	3.4×10^3	ND
	4	2.5×10^6	< 100
ปกติ	0	1.19×10^3	< 100
	1	2.3×10^3	< 100
	2	7×10^3	< 100
	3	2×10^4	< 100
	4	7×10^5	< 100
N ² 80% : CO ₂ 20%	0	3.3×10^2	< 100
	1	8.6×10^2	< 100
	2	1.4×10^3	< 100
	3	1.7×10^3	< 100
	4	1.5×10^3	< 100
	5	2.2×10^3	< 100
	6	3.3×10^3	< 100
	7	2.5×10^4	< 100
	8	3.2×10^4	< 100
	9	1.5×10^5	< 100
	10	2.6×10^6	< 100

สภาวะการเก็บ	อายุการเก็บรักษา (วัน)	ผลการวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์	
		จุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	<i>S.aureus</i> (โคโลนี/กรัม)
N ₂ 100%	0	1.3×10^3	ND
	1	1.4×10^3	ND
	2	3.8×10^2	ND
	3	1.4×10^3	< 100
	4	8.0×10^4	< 100
	5	2.8×10^4	< 100
	6	1.6×10^3	< 100
	7	1.6×10^5	ND
	8	5.2×10^4	< 100
	9	1.3×10^5	< 100
	10	1.8×10^5	< 100
N ₂ 60% : CO ₂ 40%	0	2.7×10^2	< 100
	1	3.0×10^2	< 100
	2	4.0×10^2	< 100
	3	1.6×10^3	< 100
	4	2.8×10^3	< 100
	5	2.6×10^3	< 100
	6	1.3×10^3	ND
	7	4.6×10^4	< 100
	8	6.8×10^4	< 100
	9	2.0×10^5	< 100
	10	8.2×10^5	< 100
N ² 70% : CO ₂ 30%	0	2.8×10^2	< 100
	1	2.7×10^2	< 100
	2	4.1×10^2	< 100
	3	1.5×10^3	< 100
	4	6.0×10^3	< 100
	5	1.2×10^3	< 100
	6	6.0×10^3	< 100
	7	1.6×10^4	< 100
	8	2.4×10^5	< 100
	9	1.0×10^5	< 100
	10	1.3×10^5	< 100
	11	6.6×10^5	< 100

สภาวะ การเก็บ	อายุการเก็บ รักษา (วัน)	ผลการวิเคราะห์ด้านจุลินทรีย์	
		จุลินทรีย์ ทั้งหมด (CFU/g)	S.aureus (โคโลนี/ กรัม)
	12	3.0×10^6	< 100
CO ₂ 100%	0	3.5×10^2	ND
	1	6.7×10^2	ND
	2	1.2×10^3	ND
	3	1.0×10^3	ND
	4	1.5×10^3	< 100
	5	1.4×10^3	< 100
	6	1.1×10^3	ND
	7	1.1×10^3	ND
	8	4.5×10^4	< 100
	9	1.5×10^4	< 100
	10	1.5×10^5	< 100
	11	2.3×10^5	< 100
	12	7.2×10^5	< 100
	13	4.5×10^6	< 100

หมายเหตุ : ND หมายถึง ไม่พบโคโลนีของเชื้อหรือมีเชื่อน้อยกว่า 10 โคโลนี

จากตารางที่ 6 การตรวจสอบคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของขนม มะพร้าวแก้วที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะดัดแปรที่แตกต่างกัน ตั้งแต่วันที่ 0-15 พบว่า จากการเก็บรักษาโดยใช้สภาวะดัดแปร สภาวะ Vacuum ,ปกติ ,N₂ 80% : CO₂ 20% ,N₂ 100% , N₂ 60% : CO₂ 40% , N₂ 70% : CO₂ 30% และ CO₂ 100% ผลการศึกษาพบว่า จำนวนวันที่สามารถเก็บรักษาได้และไม่เกินค่ามาตรฐาน อยู่ที่ 2.5×10^6 , 2.4×10^6 , 2.6×10^6 , 2.5×10^6 , 1.4×10^6 , 3.0×10^6 และ 4.5×10^5 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้สภาวะดัดแปรในการเก็บรักษามะพร้าวแก้ว และสามารถยืดอายุการเก็บรักษามะพร้าวแก้วได้นานที่สุด โดยใช้ CO₂ 100% ซึ่งสามารถเก็บได้นานที่สุด 12 วัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีคุณสมบัติเป็น Bacteriostatic สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ [19] และ [20]

ซึ่ง N. M. Dixon and D. B. Kell [21] รายงานว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถชะลอการเข้าสู่ระยะ log phase และเพิ่มระยะ lag phase ของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารได้

4. สรุป

การศึกษาผลของการใช้อิริทธิทอลทดแทนน้ำตาลทรายต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของมะพร้าวแก้วภายใต้สภาวะดัดแปรเพื่อสุขภาพและส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชน พบว่าสูตรพื้นฐานมะพร้าวแก้วสูตรที่ 4 ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด โดยมีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก ขณะที่การใช้อิริทธิทอลทดแทนน้ำตาลทรายร้อยละ 30 ได้รับการยอมรับสูงสุดในทุกด้านที่ประเมิน โดยมีคะแนนความชอบรวมเฉลี่ย 8.59 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีพบว่าสูตรที่ใช้อิริทธิทอลร้อยละ 30 มีปริมาณความชื้นและเถ้าสูงสุด เท่ากับร้อยละ 2.08 และ 0.86 ตามลำดับ ส่วนสูตรที่ใช้อิริทธิทอลร้อยละ 20 มีปริมาณไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรตสูงสุด เท่ากับร้อยละ 11.32, 2.16 และ 82.99 ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพด้านสี พบว่าสูตรที่ใช้อิริทธิทอลร้อยละ 10 มีค่าความสว่าง (L*) สูงสุด เท่ากับ 57.25 ขณะที่สูตรที่ใช้อิริทธิทอลร้อยละ 20 มีค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) สูงสุด เท่ากับ 11.95 และ 27.48 ตามลำดับ นอกจากนี้ การศึกษาคุณภาพทางจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาภายใต้สภาวะดัดแปรบรรยากาศเป็นเวลา 15 วัน พบว่า การเก็บรักษาแบบสุญญากาศมีอายุการเก็บรักษา 3 วัน ส่วนการเก็บรักษาภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100% สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 12 วัน โดยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาพบปริมาณเชื้อ Staphylococcus aureus ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่

กำหนด สรุปลงได้ว่าการใช้อิทธิพลทดแทนน้ำตาลทราย ร้อยละ 30 เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์มะพร้าวแก้วเพื่อสุขภาพ และการเก็บรักษา ภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100% สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการเก็บรักษาแบบสุญญากาศ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะผู้บริหาร คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ ผู้ช่วยนักวิจัย และนักศึกษา คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ตลอดจนชุมชนและภาคเอกชนกลุ่มเป้าหมาย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Program Management Unit for Area-Based Development (PMU-A), “Development and Value Enhancement of OTOP Products to Increase Competitiveness Based on Local Cultural Resources in Phetchaburi Province,” [Online]. <https://pmua.or.th/research>. [Accessed: Feb. 15, 2025]
- [2] International Food Information Council Foundation, “Stevia Sweeteners: Another Low-Calorie Option,” [Online]. <https://www.foodinsight.org>. [Jun. 24, 2026]
- [3] F. Devlieghere, L. Vermeiren, M. Jacobs, and J. Debevere, “The effectiveness of hexamethylenetetramine-incorporated plastic for the active packaging of foods,” *Packaging Technology and Science*, vol. 13, no. 3, pp. 117–121, 2000.
- [4] World Health Organization, “Use of Non-Sugar Sweeteners: WHO Guideline,” [Online]. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073616>. [Accessed: Mar. 9, 2026]
- [5] EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), “Re-evaluation of erythritol (E 968) as a food additive,” *EFSA Journal*, vol. 21, no. 12, e8430, 2023.
- [6] N. Pathak, S. Dubey, and S. Verma, “Sensory evaluation and nutritional composition of developed papaya jam and papaya candy,” *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 10, no. 1, pp. 207–210, 2021.
- [7] K. Khamrui, “Sensory and colour profile of milk-coconut sweet as a function of ingredients using response surface methodology,” *Indian Journal of Dairy Science*, vol. 70, no. 5, pp. 1–7, 2017.
- [8] N. L. C. Nicolas, J. Marpuilly, and M. O'Mahony, “The 9-point hedonic scale: Are words and numbers compatible,” *Food Quality and Preference*, vol. 21, pp. 1008–1015, 2010.
- [9] O. A. Alokun-Adesanya and O. J. Adebawale, “Physicochemical properties and sensory evaluation of milk candy ‘toffee’ (a Nigeria candy) enrich with coconut, tigernut and groundnut,” *Federal Polytechnic Ilaro Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 53–60, 2022.
- [10] W. Srisuk, “Diabetes: Choosing Coffee Sweeteners Instead of Sugar,” Faculty of

- Pharmacy, Mahidol University, [Online]. <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th>. [Accessed: Mar. 12, 2026]
- [11] Association of Official Analytical Chemists (AOAC), *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 14th ed. Arlington, VA, USA: AOAC, 1984.
- [12] S. Soonthornnarungsri and N. Kandanont, "Quality improvement and processing of coconut sheet candy," in *Proceedings of the 34th Kasetsart University Annual Conference*, Bangkok, Thailand, 1996, pp. 233–242.
- [13] Food Science and Technology Association of Thailand, "Conditions for Nutritional Claims of Sugar," in *Proceeding of Food Safety Seminar*, Bangkok, Thailand, pp. 74–75.
- [14] P. Sinchaipanit, N. Peasura, A. Sangsuriyawong, and S. Disnil, "Testing the shelf-life of food products under accelerated temperature," *Burapha Science Journal*, vol. 27, no. 2, pp. 1930–1949, 2022.
- [15] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- [16] A. N. Olaimat, T. M. Osaili, M. A. A. Holy, A. A. Nabulsi, R. S. Obaid, A. R. Alaboudi, M. Ayyash, and R. Holley, "Microbial safety of oily, low water activity food products: A review," *Food Microbiology*, vol. 92, 2020.
- [17] Y. Xia, J. Song, F. Zhong, J. Halim, and M. O'Mahony, "The 9-point hedonic scale: Using R-Index Preference Measurement to compute effect size and eliminate artifactual ties," *Food Research International*, vol. 133, 2020.
- [18] M. S. Tapia, S. M. Alzamora, and J. Chirife, "Effects of Water Activity (aw) on Microbial Stability as a Hurdle in Food Preservation," in *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020.
- [19] J. A. Daniels, R. Krishnamurthi, and S. S. H. Rizvi, "A review of effects of carbon dioxide on microbial growth and food quality," *Journal of Food Protection*, vol. 48, no. 6, pp. 532–537, 1985.
- [20] Department of Agricultural Extension, "Coconut and Its Economic Utilization," Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, [Online]. Available: <https://www.doe.go.th>. [Accessed: Feb. 11, 2026]
- [21] N. M. Dixon and D. B. Kell, "The inhibition by CO₂ of the growth and metabolism of micro-organisms," *Journal of Applied Bacteriology*, vol. 67, no. 2, pp. 109–136, 1989.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอาหารสดและอาหารสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum*) ที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเล บริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่

ฤทธิชัย คงสบาย^{1*} นัทพงศ์ ชุมเชื้อ² นพพนธ์ ชะนะพาล² ปิยะวัฒน์ พรหมรักษา¹
วรวิษ ป่านนาค¹ และ ปิยะภาคย์ ภูมิภมร²

¹สถานีวิจัยเพื่อการพัฒนาชายฝั่งอันดามัน คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ศูนย์วิจัยและบริการวิชาการภูมิภาคอันดามัน จังหวัดกระบี่

¹81 ม.2 ตำบลกำแพง อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดระยอง 85120

²214 หมู่ 6 ตำบลห้วยยูง อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่ 81130

รับบทความ 11 มีนาคม 2569 แก้ไขบทความ 12 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 24 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum*) ที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 3 ชุดการทดลอง ชุดละ 3 ซ้ำ ปล่อยปลาทดลอง 30 ตัวต่อกระชัง และดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของปลาไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ปลาที่ได้รับอาหารสดมีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายสูงที่สุด ($2,023.16 \pm 22.62$ กรัม) และมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด (8.01 ± 0.13 กรัมต่อวัน) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากกลุ่มที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูป ($p<0.05$) ขณะที่ความยาวเฉลี่ยสุดท้ายมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) แต่ไม่พบความแตกต่างของอัตราการเพิ่มความยาวเฉลี่ยต่อวัน ($p>0.05$) อัตราการรอดตายอยู่ระหว่าง 91.12 ± 2.65 ถึง 93.34 ± 2.31 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เช่นเดียวกับค่าอัตราแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.60 ± 0.31 ถึง 1.72 ± 0.31 คุณภาพน้ำโดยรวมอยู่ในช่วงที่สามารถรองรับการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเลได้ตลอดระยะเวลาการศึกษา สรุปได้ว่า อาหารสดประเภทปลาหลังเขียวสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเลได้ดีกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลองภายใต้สภาพการเลี้ยงของพื้นที่ศึกษา และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : ปลาช่อนทะเล; *Rachycentron canadum*; อาหารสด; อาหารเม็ดสำเร็จรูป; การเจริญเติบโต; กระชังทะเล

Comparison of Fresh Fish and Formulated Diets on Growth Performance of Cobia (*Rachycentron canadum*) Cultured in Sea Cages in Ban Ko Pu, Krabi Province, Thailand

Rittichai Kongsabai^{1*} Nattapong Chumchuea² Nopphanon Chanaphan²
Piyawat Promraksa¹ Worawit Pannak¹ and Piyapak Bhumibhamorn²

¹Andaman Coastal Research Station for Development, Faculty of Fisheries, Kasetsart University

²Research and Academic Service Center for Andaman Region, Krabi Province

¹81 Moo 2, Kamphuan Subdistrict, Suk Samran District, Ranong, 85120

²214 Moo 6, Huai Yung Subdistrict, Nuea Khlong District, Krabi, 81130

Received 11 March 2026; Revised 12 June 2026; Accepted 24 June 2026

Abstract

This study aimed to compare the effects of fresh fish feed and commercial pellet diets on growth performance, survival rate, and feed utilization efficiency of cobia (*Rachycentron canadum*) cultured in marine cages at Ban Koh Pu, Krabi Province, Thailand. A Completely Randomized Design (CRD) consisting of three dietary treatments with three replicates per treatment was employed. Thirty fish were stocked in each cage and reared for 180 days. The results showed that the initial body weight of fish did not differ significantly among treatments ($p>0.05$). At the end of the experiment, fish fed the fresh fish feed exhibited the highest final body weight ($2,023.16\pm22.62$ g) and daily weight gain (8.01 ± 0.13 g day⁻¹), which were significantly higher than those of fish fed the commercial pellet diets ($p<0.05$). Final body length differed significantly among treatments ($p<0.05$), whereas daily length gain showed no significant difference ($p>0.05$). Survival rates ranged from 91.12 ± 2.65 to $93.34\pm2.31\%$ and did not differ significantly among treatments ($p>0.05$). Similarly, feed conversion ratio (FCR) values ranged from 1.60 ± 0.31 to 1.72 ± 0.31 , with no significant differences among treatments. Overall water quality remained within ranges suitable for marine cage culture of cobia throughout the study period. The findings indicate that fresh fish feed promoted better growth performance than the commercial pellet diets under the culture conditions of the present study. The results provide useful information for feed management strategies in community-based and commercial cobia cage farming operations.

Keywords: Cobia; *Rachycentron canadum*; Fresh fish feed; Commercial pellet diet; Growth performance; Marine cage culture

* Corresponding Author. Tel.: +66 7788 0297, E-mail Address: rittichai.kon@ku.th

1. บทนำ

ปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum* Linnaeus, 1766) เป็นปลาทะเลเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูงต่อการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว เนื้อมีคุณภาพดี และเป็นที่ต้องการของตลาดอาหารทะเลในหลายประเทศ [1], [2] ปลาชนิดนี้สามารถเลี้ยงได้ทั้งในระบบกระชังทะเลและระบบน้ำหมุนเวียน โดยความสำเร็จของการเลี้ยงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณภาพลูกพันธุ์ ความหนาแน่นการเลี้ยง คุณภาพน้ำ การจัดการสุขภาพปลา และการจัดการอาหารที่เหมาะสม [2], [3] อาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และต้นทุนการผลิตของปลาช่อนทะเล งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางโภชนาการของอาหาร โดยเฉพาะระดับโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และความสมดุลของพลังงาน มีผลต่อการใช้ประโยชน์สารอาหาร การสะสมพลังงาน และสมรรถนะการเจริญเติบโตของปลา [4], [9] นอกจากนี้ การพัฒนาสูตรอาหารเม็ดสำเร็จรูปและการใช้วัตถุดิบโปรตีนทางเลือกยังเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการพึ่งพาวัตถุดิบจากปลาป่นในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์น้ำ [5], [10], [11]

ในการเลี้ยงปลาช่อนทะเลระดับเกษตรกรอาหารสดยังคงถูกใช้ในหลายพื้นที่ เนื่องจากหาได้ง่าย มีความน่ากินสูง และสอดคล้องกับพฤติกรรมการกินอาหารของปลากินเนื้อ อย่างไรก็ตาม อาหารสดอาจมีความแปรปรวนด้านคุณค่าทางโภชนาการ คุณภาพวัตถุดิบ การเก็บรักษา และความเสี่ยงต่อการเสื่อมคุณภาพระหว่างการใช้งาน ขณะที่อาหารเม็ดสำเร็จรูปมีข้อดีด้านความสะดวกในการจัดการ การควบคุมองค์ประกอบทางโภชนาการ และการลดความแปรปรวนของคุณภาพอาหาร [4], [5], [14] ดังนั้น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปภายใต้สภาพการเลี้ยงจริงจึงมีความสำคัญต่อ

การเลือกแนวทางการจัดการอาหารที่เหมาะสมสำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงปลาช่อนทะเล

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการจัดการปริมาณอาหาร ความพร้อมของอาหาร และกรดอะมิโนจำเป็นบางชนิดมีผลต่อการเจริญเติบโต การใช้ประโยชน์โปรตีน และการสะสมไนโตรเจนของปลาช่อนทะเล [12], [13] ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอาหารที่เหมาะสมไม่ได้พิจารณาเพียงปริมาณโปรตีนหรือไขมันเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงความสมดุลของสารอาหาร คุณภาพวัตถุดิบ ความน่ากิน และความเหมาะสมกับระบบการเลี้ยงในแต่ละพื้นที่ด้วย พื้นที่บ้านเกาะบุตาบลเกาะศรีบอยา อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่เป็นพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามันที่มีการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบกระชังทะเล และมีศักยภาพต่อการพัฒนาการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระดับชุมชน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเปรียบเทียบผลของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเลภายใต้สภาพการเลี้ยงจริงในพื้นที่ดังกล่าวยังมีจำกัด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาช่อนทะเลที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะบุตาบล จังหวัดกระบี่ รวมทั้งติดตามคุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจัดการอาหารและการพัฒนาการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการรอดตายของปลาช่อนทะเล ที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเลบริเวณพื้นที่บ้านเกาะบุตาบลเกาะศรีบอยา อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่

การวิจัยดำเนินการภายใต้แนวคิดการวิจัยแบบชุมชนมีส่วนร่วม (Participatory research) โดยเกษตรกรผู้เลี้ยงปลาช่อนทะเลในพื้นที่ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินกิจกรรมวิจัย เช่น การจัดเตรียมกระชัง การให้อาหาร การติดตามการเจริญเติบโตของปลา และการบันทึกข้อมูลระหว่างการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้การทดลองสอดคล้องกับสภาพการเลี้ยงจริงของเกษตรกรในพื้นที่ และสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง (Treatments) ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ (Replicates) ในแต่ละซ้ำปล่อยปลาช่อนทะเลจำนวน 30 ตัว

รายละเอียดชุดการทดลองมีดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ให้อาหารปลาสด (ปลาหลังเขียว; ชุดควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 ให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 8 เปอร์เซ็นต์

ชุดการทดลองที่ 3 ให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ใช้ปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum*) จำนวน 270 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 500–600 กรัม เลี้ยงในกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู ตำบลเกาะศรีบอยา อำเภอนือคล่อง จังหวัดกระบี่

กระชังทดลองเป็นกระชังตาข่ายไนลอน ขนาดตาอวน 2.5 เซนติเมตร มีขนาดกว้าง 2.5 เมตร ยาว 3.0 เมตร และลึก 2.5 เมตร คิดเป็นปริมาตรน้ำประมาณ 18.75 ลูกบาศก์เมตร ติดตั้งในทะเลโดยยึดกับทุ่นลอยและสมอเพื่อป้องกันผลกระทบจากกระแสน้ำและคลื่นลม

ปล่อยปลาทดลองจำนวน 30 ตัวต่อกระชัง คิดเป็นความหนาแน่นประมาณ 1.60 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเล [9], [20]

2.1.2 การเตรียมอาหารทดลอง

อาหารที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอาหารปลาสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูป 2 สูตร โดยอาหารปลาสดใช้ปลาหลังเขียวเป็นอาหารในชุดควบคุม จัดซื้อจากตลาดสัตว์น้ำในจังหวัดกระบี่และเก็บรักษาในสภาพแช่เย็นจนกว่าจะนำมาใช้ ส่วนอาหารเม็ดสำเร็จรูปทั้งสองสูตรมีส่วนประกอบหลักเหมือนกัน แต่มีการปรับปริมาณน้ำมันทูน่า (Tuna oil) เพื่อให้ระดับไขมันแตกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่ 2 มีระดับไขมันประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองที่ 3 มีระดับไขมันประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดส่วนประกอบและองค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารทดลองแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปลาหลังเขียวที่ใช้เป็นอาหารควบคุม

พารามิเตอร์ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความชื้น	73.20 $\pm$ 0.40
โปรตีนหยาบ	18.95 $\pm$ 0.35
ไขมันหยาบ	5.80 $\pm$ 0.30
เถ้า	1.85 $\pm$ 0.10
คาร์โบไฮเดรต	0.20 $\pm$ 0.05
รวม	100.00

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของสูตรอาหารทดลอง

ส่วนประกอบอาหาร (ร้อยละ)	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
ปลาป่น	40.50	40.50
กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน	11.00	11.00

ส่วนประกอบ อาหาร (ร้อยละ)	ชุดการทดลอง ที่ 2	ชุดการทดลอง ที่ 3
ผลพลอยได้จาก	12.00	12.00
สัตว์ปีกปน		
กลูเตนข้าวสาลี	2.50	2.50
แป้งสาลี	24.30	20.30
แคลเซียม	2.00	2.00
คาร์บอนเนต		
โมโนแคลเซียม	1.00	1.00
ฟอสเฟต		
น้ำมันทูน่า	5.65	9.65
วิตามินพรีมิกซ์	0.20	0.20
แร่ธาตุพรีมิกซ์	0.20	0.20
สารยีสต์เกาะ	0.25	0.25
สารป้องกันเชื้อรา	0.20	0.20
บีเอชที (BHT)	0.20	0.20
รวม	100.00	100.00

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของอาหารทดลอง

พารามิเตอร์	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
โปรตีนหยาบ	40.00	40.00
ไขมันหยาบ	8.00	12.00

2.1.3 การให้อาหารและการจัดการการเลี้ยง

ให้อาหารปลาช่อนทะเลวันละ 2 ครั้ง เวลา 08.00 น. และ 16.00 น. โดยให้อาหารจนปลาหยุดกิน (apparent satiation) และทำการบันทึกปริมาณอาหารที่ใช้ในแต่ละวัน เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณประสิทธิภาพการใช้อาหาร การทดลองดำเนินการเป็นระยะเวลา 180 วัน

2.1.4 การวัดการเจริญเติบโตของปลา

ก่อนเริ่มการทดลองทำการสุ่มชั่งน้ำหนักและวัดความยาวเริ่มต้นของปลาช่อนทะเล จากนั้นทำการสุ่มชั่งวัดขนาดปลาประมาณร้อยละ 10 ของจำนวนปลาในแต่ละกระชังทุก ๆ 30 วัน ตัวแปรที่ทำการวัด ได้แก่

น้ำหนักรวมของปลา (Total weight; TW) และความยาวรวมของปลา (Total length; TL)

$$\text{น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักปลารวม (กรัม)}}{\text{จำนวนปลา}}$$

$$\text{ความยาวเฉลี่ย (เซนติเมตร)} = \frac{\text{ความยาวปลารวม (เซนติเมตร)}}{\text{จำนวนปลา}}$$

อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average Daily

$$\text{Gain; ADG}) = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันทดลอง}}$$

อัตราแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) =

$$\frac{\text{ปริมาณอาหารที่กินทั้งหมด (กรัม)}}{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (กรัม)}}$$

อัตราการรอดตาย (Survival Rate; SR) =

$$\frac{\text{จำนวนปลาช่อนทะเลเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาช่อนทะเลเริ่มต้น}} \times 100$$

2.1.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตรวจวัดคุณภาพน้ำทุก 30 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยเก็บข้อมูลบริเวณกึ่งกลางกระชังแต่ละกระชัง พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดในภาคสนาม ได้แก่ ความเค็ม อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยความเค็มวัดด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิวัดด้วยเครื่องวัดออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างวัดด้วยเครื่อง pH meter

เก็บตัวอย่างน้ำปริมาตรประมาณ 200 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์แอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และความเป็นต่างในห้องปฏิบัติการตามวิธีมาตรฐานของ American Public Health Association โดยใช้วิธี Koroleff's indophenol blue method สำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียรวม วิธี colorimetric method สำหรับการวิเคราะห์ไนไตรต์ และวิธี titration method สำหรับการ

วิเคราะห์ความเป็นต่าง พร้อมตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer [15]

2.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติด้วยวิธี Shapiro-Wilk test และตรวจสอบความแปรปรวนเท่ากันด้วยวิธี Levene's test ก่อนการวิเคราะห์ทางสถิติ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way Analysis of Variance (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร อัตราการรอดตาย และคุณภาพน้ำระหว่างชุดการทดลอง เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Fisher's Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ การวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดดำเนินการโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics for Windows version 25.0 [16]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล



รูปที่ 1 ปลาช่อนทะเลที่ใช้ในการทดลองเลี้ยงในระบบ กระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่

3.1 การเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเล

ผลการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และอัตราแลกเนื้อของปลาช่อนทะเลที่ได้รับอาหารต่างชนิดกันเป็นระยะเวลา 180 วัน แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า น้ำหนักเริ่มต้นของปลาช่อนทะเลในทุกชุดการทดลองไม่

แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 555.30 ± 12.20 ถึง 580.43 ± 14.32 กรัม แสดงให้เห็นว่าปลาที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเริ่มต้นใกล้เคียงกัน และเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบผลของอาหารแต่ละชนิดต่อการเจริญเติบโต เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายของปลาช่อนทะเลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารสดประเภทปลาหลังเขียวมีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายสูงที่สุดเท่ากับ $2,023.16 \pm 22.62$ กรัม รองลงมาคือปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 8 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ $1,795.34 \pm 44.91$ กรัม และปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ $1,705.35 \pm 14.90$ กรัม ตามลำดับ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวัน โดยปลาที่ได้รับอาหารสดมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 8.01 ± 0.13 กรัมต่อวัน และแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูปทั้งสองชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอาหารสดประเภทปลาหลังเขียวสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักของปลาช่อนทะเลได้ดีกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลองภายใต้สภาพการเลี้ยงในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากอาหารสดมีความน่ากินสูง มีกลิ่นและลักษณะใกล้เคียงกับอาหารตามธรรมชาติของปลากินเนื้อ ส่งผลให้ปลายอมรับอาหารและกินอาหารได้ดี งานวิจัยของ Huang et al. [4] รายงานว่าอาหารสดหรือปลาแช่แข็งสามารถส่งผลต่อการกินอาหาร การเจริญเติบโต และตัวชี้วัดทางสรีรวิทยาของปลาช่อนทะเลวัยรุ่นได้แตกต่างจากอาหารสูตรสำเร็จ ขณะที่ Raggi et al. [5] และ Hardy and Kaushik [14] ระบุว่าคุณภาพวัตถุดิบ ความสมดุลของสารอาหาร และความน่ากินของอาหารเป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้ประโยชน์อาหารและการเจริญเติบโตของปลาทะเล

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองครั้งนี้ไม่ควรสรุปว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปไม่มีศักยภาพต่อการเลี้ยงปลาช่อนทะเล เนื่องจากอาหารเม็ดมีข้อดีด้านการควบคุมคุณค่าทางโภชนาการ ความสะดวกในการจัดการ และการลดความแปรปรวนของคุณภาพอาหาร เมื่อพิจารณาระหว่างอาหารเม็ดสำเร็จรูปทั้งสองสูตร พบว่าชุดที่มีไขมัน 8 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มให้น้ำหนักสุดท้ายและอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าชุดที่มีไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์ แม้ทั้งสองชุดจะไม่แตกต่างกันทางสถิติในบางตัวแปร ผลดังกล่าวอาจสะท้อนว่าการเพิ่มระดับไขมันในอาหารเพียงอย่างเดียวอาจไม่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต หากสัดส่วนพลังงานต่อโปรตีนหรือความสัมพันธ์ระหว่างไขมันและคาร์โบไฮเดรตยังไม่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่พบว่าระดับไขมันคาร์โบไฮเดรต และสัดส่วนพลังงานในอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์อาหารของปลาช่อนทะเล [7] - [9]

3.2 การเจริญเติบโตด้านความยาว

ความยาวเริ่มต้นของปลาช่อนทะเลในทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 30.50 ± 0.75 ถึง 32.00 ± 0.51 เซนติเมตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าความยาวเฉลี่ยสุดท้ายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารสดมีความยาวเฉลี่ยสุดท้ายสูงที่สุด เท่ากับ 84.50 ± 0.75 เซนติเมตร ขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 8 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีน 40 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์ มีความยาวเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 75.50 ± 0.21 และ 72.50 ± 0.38 เซนติเมตร ตามลำดับ

แม้ว่าความยาวเฉลี่ยสุดท้ายจะแตกต่างกันทางสถิติ แต่อัตราการเพิ่มความยาวเฉลี่ยต่อวันไม่แตกต่างกันระหว่างชุดการทดลอง ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.22 ± 0.02 ถึง 0.30 ± 0.01 เซนติเมตรต่อวัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลของอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเลในการศึกษาครั้งนี้สะท้อนชัดเจนในด้านน้ำหนักมากกว่าความยาว ทั้งนี้ น้ำหนักตัวเป็นตัวแปรที่ตอบสนองต่อการสะสมสารอาหารและพลังงานได้ไวกว่า ขณะที่ความยาวลำตัวอาจเปลี่ยนแปลงช้ากว่าในช่วงระยะเวลาการเลี้ยงเดียวกัน ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับคุณภาพวัตถุดิบ ความน่ากินของอาหาร ความสมดุลของสารอาหาร และความสามารถในการใช้ประโยชน์อาหารของปลา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของปลาช่อนทะเล [4], [5], [14]

3.3 อัตราการรอดตายและอัตราแลกเนื้อ

อัตราการรอดตายของปลาช่อนทะเลในทุกชุดการทดลองอยู่ในระดับสูง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 91.12 ± 2.65 ถึง 93.34 ± 2.31 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอาหารทั้งสามรูปแบบไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการรอดตายของปลาช่อนทะเลภายใต้สภาพการเลี้ยงในการทดลองครั้งนี้ การที่อัตราการรอดตายอยู่ในระดับสูงอาจเกี่ยวข้องกับการจัดการกระชังที่เหมาะสม ความหนาแน่นการเลี้ยงไม่สูงเกินไป และคุณภาพน้ำด้านกายภาพที่ยังสามารถรองรับการเลี้ยงปลาได้ตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าการจัดการระบบเลี้ยงคุณภาพน้ำ และความเหมาะสมของสภาพแวดล้อมมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตและอัตราการรอดของปลาช่อนทะเล [1]-[3]

ตารางที่ 4 การเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และอัตราแลกเนื้อของปลาช่อนทะเลที่ได้รับอาหารต่างชนิดกันเป็นระยะเวลา 180 วัน

พารามิเตอร์	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	580.43±14.32 ^a	555.30±12.20 ^a	565.27±17.21 ^a
น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	2023.16±22.62 ^a	1795.34±44.91 ^b	1705.35±14.90 ^b
อัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อวัน)	8.01±0.13 ^a	6.89±0.25 ^b	6.35±0.22 ^b
ความยาวเริ่มต้น (เซนติเมตร)	30.50±0.75 ^a	31.50±0.68 ^a	32.00±0.51 ^a
ความยาวสุดท้าย (เซนติเมตร)	84.50±0.75 ^a	75.50±0.21 ^b	72.50±0.38 ^b
อัตราการเพิ่มความยาวเฉลี่ยต่อวัน (เซนติเมตรต่อวัน)	0.30±0.01 ^a	0.24±0.02 ^a	0.22±0.02 ^a
อัตราการรอดตาย (เปอร์เซ็นต์)	93.34±2.31 ^a	91.12±2.65 ^a	92.23±2.22 ^a
อัตราแลกเนื้อ	1.60±0.31 ^a	1.63±0.33 ^a	1.72±0.31 ^a

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3) ตัวอักษรภาษาอังกฤษด้วยกที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

อัตราแลกเนื้อของปลาช่อนทะเลมีค่าอยู่ระหว่าง 1.60 ± 0.31 ถึง 1.72 ± 0.31 และไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างชุดการทดลอง (p > 0.05) โดยปลาที่ได้รับอาหารสดมีค่าอัตราแลกเนื้อต่ำที่สุดในเชิงตัวเลข แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูป ดังนั้นควรอธิบายผลในลักษณะ “มีแนวโน้ม” มากกว่าการสรุปว่าอาหารสดมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อดีกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้ การเปรียบเทียบค่าอัตราแลกเนื้อระหว่างอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปควรพิจารณาด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากอาหารสดมีความชื้นสูงกว่าอาหารเม็ดมาก หากคำนวณจากน้ำหนักอาหารตามสภาพที่ใช้จริง ค่าอัตราแลกเนื้อที่ได้อาจสะท้อนการใช้วัตถุดิบในภาคสนามมากกว่าประสิทธิภาพทางโภชนาการในระดับวัตถุดิบ ดังนั้นในการนำผลไปใช้ประโยชน์ ควรพิจารณาร่วมกับต้นทุนอาหาร ความสะดวกในการจัดการ ความสม่ำเสมอของคุณภาพอาหาร และผลตอบแทนทาง

เศรษฐศาสตร์ของระบบการเลี้ยง การตีความค่าอัตราแลกเนื้อจึงควรพิจารณาพร้อมกับองค์ประกอบทางโภชนาการ คุณภาพวัตถุดิบ และการใช้ประโยชน์สารอาหารของปลา [4], [5], [14]

3.4 คุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยง

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าความเค็มมีค่าอยู่ระหว่าง 28.53–34.00 ส่วนในพัน ค่าเฉลี่ย 32.00 ± 0.75 ส่วนในพัน อุณหภูมิมีค่าอยู่ระหว่าง 28.40–30.25 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ย 29.25 ± 2.22 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าอยู่ระหว่าง 7.47–8.91 ค่าเฉลี่ย 8.14 ± 0.51 และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 5.30–7.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ย 6.45 ± 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 5 คุณภาพน้ำที่ตรวจวัดระหว่างการเล่นปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ความลึก (เมตร)	0.80-3.50	2.55±0.68
ความโปร่งใส (เมตร)	0.70-3.10	2.70±0.02
ความเค็ม (ppm)	28.53-34.00	32±0.75
pH	7.47-8.91	8.14±0.51
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.40-30.25	29.25±2.22
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.30-7.12	6.45±0.21
แอมโมเนีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.45-4.32	3.42±0.02
ไนโตรด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.00-4.79	2.79±0.22
ไนเตรด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.03-0.49	0.34±0.13
ออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.03-0.76	0.42±0.13

หมายเหตุ: ค่าคุณภาพน้ำแสดงเป็นค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 180 วัน

ค่าคุณภาพน้ำด้านกายภาพและปริมาณออกซิเจนละลายน้ำดังกล่าวอยู่ในช่วงที่สามารถรองรับการเลี้ยงปลาทะเลในระบบกระชังได้ โดยเฉพาะค่าความเค็ม อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และออกซิเจนละลายน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการกินอาหาร การเผาผลาญพลังงาน และสุขภาพของปลา การจัดการคุณภาพน้ำที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการเลี้ยงปลาช่อนทะเลทั้งในระบบกระชังทะเลและระบบควบคุมคุณภาพน้ำ [2], [3] อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียและไนโตรด มีค่าผันแปรค่อนข้างมากในบางช่วงเวลา จึงควรติดตามอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากพื้นที่เลี้ยงอยู่ใกล้ชุมชนชายฝั่ง และอาจได้รับอิทธิพลจากการสะสมของอินทรีย์วัตถุ เศษอาหาร และของเสียจากปลา การวิเคราะห์และติดตามคุณภาพน้ำอย่างสม่ำเสมอตามวิธีมาตรฐานจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่เลี้ยงและการจัดการความเสี่ยงในระบบกระชังทะเล [15]

แม้ว่าการศึกษาครั้งนี้จะพบว่าอัตราการรอดตายของปลาทุกชุดการทดลองยังอยู่ในระดับสูง แต่การจัดการคุณภาพน้ำยังเป็นประเด็นสำคัญในการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเล โดยเฉพาะการควบคุมปริมาณ

อาหารที่ให้ การป้องกันอาหารเหลือ การทำความสะอาดกระชัง และการเลือกพื้นที่เลี้ยงที่มีการไหลเวียนของน้ำเหมาะสม เพื่อลดความเสี่ยงจากการสะสมของสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนในระยะยาว [2], [3], [15]



รูปที่ 2 ลักษณะกระชังทะเลที่ใช้เลี้ยงปลาช่อนทะเล บริเวณบ้านเกาะปู ตำบลเกาะศรีบอยา อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่

4. สรุป

การศึกษาผลของอาหารสดและอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum*) ที่เลี้ยงในระบบกระชังทะเลบริเวณบ้านเกาะปู จังหวัดกระบี่ เป็นระยะเวลา

180 วัน พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารสดประเภทปลาหลังเขียวมีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายและอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารเม็ดสำเร็จรูปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอาหารสดมีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักของปลาช่อนทะเลภายใต้สภาพการเลี้ยงในพื้นที่ศึกษา ขณะที่ความยาวเฉลี่ยสุดท้ายของปลามีความแตกต่างกันระหว่างชุดการทดลอง แต่ไม่พบความแตกต่างของอัตราการเพิ่มความยาวเฉลี่ยต่อวัน อัตราการรอดตาย และอัตราแลกเนื้อระหว่างชุดการทดลอง ($p > 0.05$)

คุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงโดยรวมสามารถรองรับการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเลได้ โดยเฉพาะค่าความเค็ม อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไนโตรเจน โดยเฉพาะแอมโมเนียและไนไตรต์ ควรได้รับการติดตามอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอาจได้รับอิทธิพลจากการสะสมของอินทรีย์วัตถุ เศษอาหาร ของเสียจากปลา และกิจกรรมของชุมชนชายฝั่งในบริเวณใกล้เคียง

ผลการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า อาหารสดประเภทปลาหลังเขียวสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการอาหารสำหรับการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระดับชุมชนและเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่สามารถจัดหาอาหารสดคุณภาพดีได้อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม การนำผลไปประยุกต์ใช้ควรพิจารณาร่วมกับต้นทุนอาหาร ความสะดวกในการจัดการ คุณภาพวัตถุดิบ ความเสี่ยงจากการเสื่อมคุณภาพของอาหารสด และผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้ การศึกษาต่อไปควรประเมินต้นทุนการผลิต ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การพัฒนาสูตรอาหารเม็ดที่เหมาะสม รวมถึงการติดตามคุณภาพน้ำในช่วงฤดูกาลที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของการเลี้ยงปลาช่อนทะเลในระบบกระชังทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. D. Benetti, M. R. Orhun, B. Sardenberg, B. O'Hanlon, A. Welch, R. Hoenig, I. Zink, J. A. Rivera, B. Denlinger, D. Bacoat, K. Palmer, and F. Cavalin, "A review on cobia, *Rachycentron canadum*, aquaculture," *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 52, no. 3, pp. 691–709, 2021.
- [2] D. N. D. Muñoz, N. Díaz, O. Torres, J. C. Leiva, H. Palacios, F. Romero, and D. Benetti, "Culture of cobia *Rachycentron canadum* in a recirculation aquaculture system in northern Chile," *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 47, no. 5, pp. 733–742, 2019.
- [3] S. Reinoso, D. N. D. Muñoz, D. Benetti, and C. Cárdenas, "Feed regime slightly modifies the bacterial but not the fungal communities in the intestinal mucosal microbiota of cobia fish (*Rachycentron canadum*)," *Microorganisms*, vol. 11, no. 9, 2023.
- [4] J. S. Huang, D. Y. Chen, J. H. Jin, R. T. Xie, Y. Lu, and E. Amenyogbe, "Effects of formulated diet and frozen fresh fish on growth, serum biochemical indexes, liver antioxidant, and lipid metabolism of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)," *Aquaculture Research*, vol. 2023, 2023.
- [5] T. Raggi, A. G. J. Tacon, and D. Lemos, "Feeding of juvenile cobia, *Rachycentron canadum*: Evaluation of practical feeds, comparison of commercial fishmeal replacers, and estimation of essential amino acid requirements," *Journal of the*

- World Aquaculture Society*, vol. 50, no. 2, pp. 317–335, 2019.
- [6] N. V. Tien, D. T. M. Chinh, T. T. M. Huong, T. H. Phuong, S. Irvin, and B. Glencross, “Development of a nutritional model to define the energy and protein requirements of cobia, *Rachycentron canadum*,” *Aquaculture*, vol. 463, pp. 193–200, 2016.
- [7] P. Plaipetch and K. Yongjarean, “Growth and flesh quality of cobia fed with increased lipid and reduced protein diet and increased carbohydrate and reduced lipid diet,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 55–66, 2024.
- [8] H. Zhao, J. Cao, X. Chen, G. Wang, J. Hu, and B. Chen, “Effects of dietary lipid-to-carbohydrate ratio on growth and carbohydrate metabolism in juvenile cobia (*Rachycentron canadum*),” *Animal Nutrition*, vol. 6, no. 1, pp. 80–84, 2020.
- [9] J. Wang, K. Lan, G. Wu, Y. Wang, C. Zhou, H. Lin, and Z. Ma, “Effect of dietary carbohydrate level on growth, feed utilization, energy retention, body composition, and digestive and metabolic enzyme activities of juvenile cobia, *Rachycentron canadum*,” *Aquaculture Reports*, vol. 25, 2022.
- [10] J. Wang, G. Wu, D. M. Gatlin, K. Lan, Y. Wang, C. Zhou, and Z. Ma, “Dietary fishmeal replacement by methanol-extracted cottonseed meal with amino acid supplementation for juvenile cobia *Rachycentron canadum*,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 2, 2024.
- [11] P. Chainark, N. Prachom, S. Boonyoung, and B. Yuangsoi, “Replacement of fish meal protein with giant worm (*Zophobas morio*) and black cricket (*Gryllus bimaculatus*) in diet of cobia (*Rachycentron canadum*),” *Journal of Fisheries and Environment*, vol. 46, no. 1, pp. 122–129, 2022.
- [12] M. H. Le, M. Espe, L. E. C. Conceição, M. V. Nguyen, M. Yúfera, S. Engrola, A. E. O. Jordal, H. Q. Pham, and I. Rønnestad, “Impact of feed availability on growth performance and amino acid utilization of cobia (*Rachycentron canadum*) at elevated temperature,” *Frontiers in Aquaculture*, vol. 3, 2024.
- [13] M. V. Nguyen, M. Espe, L. E. C. Conceição, H. M. Le, M. Yúfera, S. A. D. Engrola, A.-E. O. Jordal, and I. Rønnestad, “The role of dietary methionine concentrations on growth, metabolism and N-retention in cobia (*Rachycentron canadum*) at elevated water temperatures,” *Aquaculture Nutrition*, vol. 25, no. 2, pp. 495–507, 2019.
- [14] R. W. Hardy and S. J. Kaushik, *Fish Nutrition*, 4th ed. London, United Kingdom: Academic Press, 2021.
- [15] W. C. Lipps, T. E. Baxter, and E. B. Howland, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24th ed. Washington, DC, USA: APHA Press, 2023.
- [16] IBM Corp., *IBM SPSS Statistics for Windows*, Version 25.0. Armonk, NY, USA: IBM Corp., 2017.

A Robust Machine Learning Framework for Banana Damage Classification Using Image Processing Techniques for Smart Agricultural Quality Assessment

Thanakrit Janchidfah and Narumol Chumuang*

Faculty of Industrial Technology, Muban Chombueng Rajabhat University,
46, Moo 3, Chom Bueng Subdistrict, Chom Bueng District, Ratchaburi, 70150

Received 19 April 2026; Revised 15 June 2026; Accepted 24 June 2026

Abstract

Reliable banana quality assessment remains challenging due to the subjectivity of manual inspection. This study proposes a robust and evaluation-driven framework for banana damage classification that integrates image preprocessing, texture-based feature extraction, and multi-model learning strategies. A dataset of 568 banana images categorized into three damage levels was systematically processed to extract discriminative texture descriptors, reflecting surface variations and bruising patterns observed in practical conditions. To ensure statistical reliability, multiple training–validation–testing configurations were employed to evaluate model stability across varying data distributions. Five machine learning classifiers, namely Updateable Multiclass Classifier, Sequential Minimal Optimization (SMO), Multilayer Perceptron (MLP), Random Forest, and Iterative Classifier Optimizer, were evaluated to investigate the relationship between texture representation and classifier behavior. Comparative results demonstrate that adaptive classification models achieve superior performance, with the best model reaching 91.11% accuracy and an F1-score of 0.91, while maintaining consistent performance across experimental settings. Performance depends more on feature–model compatibility than model complexity. This work contributes a reproducible and practically applicable framework for intelligent quality assessment, supporting scalable deployment in smart agriculture and reducing post-harvest losses through data-driven decision-making. The proposed framework can support automated banana grading systems in post-harvest operations, reducing inspection subjectivity and enabling scalable deployment in smart agriculture environments.

Keywords : Banana Damage Classification; Image Processing; Machine Learning; Texture Features; Smart Agriculture

* *Corresponding Author. Tel.: +666 1916 4155, E-mail Address: narumolchu@mcru.ac.th*

1. Introduction

Banana is a major economic crop whose market value is strongly influenced by external quality attributes such as peel appearance, color, and bruising [1]. In practice, post-harvest grading still relies largely on manual inspection [2], which is inherently subjective and often leads to inconsistent results, grading errors, and increased losses. As highlighted in recent FAO reports, improving post-harvest quality assessment through digital and data-driven approaches is essential for enhancing efficiency and sustainability in modern agricultural systems [3], [4].

Computer vision and machine learning have emerged as promising solutions for automated fruit quality assessment [5], offering non-destructive, scalable, and repeatable inspection [6],[7]. Recent studies demonstrate that image-based techniques can effectively detect surface defects and classify fruit quality [6]-[12], including banana bruise detection and intelligent grading systems [1], [2], [4]. However, despite these advances, current research still exhibits important limitations.

First, most studies emphasize classification accuracy under controlled conditions, with limited attention to robustness under varying data distributions. Second, evaluation is often based on a single train–test split, which does not adequately reflect model stability or generalization capability. Third, the interaction between feature representation and classifier behavior remains underexplored, even though it plays a critical role in handling continuous and overlapping damage patterns, particularly in banana surfaces where defects evolve gradually rather than discretely [1].

To address these gaps, this study proposes a robust machine learning framework for banana damage classification

that prioritizes reliability alongside performance. The framework integrates image preprocessing and texture-based feature extraction with a systematic evaluation of multiple classifiers under different training–validation–testing configurations. This approach enables a more comprehensive analysis of model stability and sensitivity to data variation, moving beyond one-time accuracy reporting.

The contributions of this work are threefold. First, it introduces an evaluation-driven framework that emphasizes robustness and generalization. Second, it provides a comparative analysis of multiple machine learning models under varying data conditions. Third, it offers insight into the relationship between feature representation and learning mechanisms, showing that classification effectiveness depends on their compatibility rather than model complexity alone.

Recent banana quality classification studies primarily focus on improving classification accuracy using CNN-based architectures or lightweight deep learning models [13],[16]. However, most studies evaluate performance using a single train–test split and provide limited analysis of model robustness, stability, and statistical significance. Unlike previous studies, the proposed framework emphasizes robustness-oriented evaluation through multi-split validation, repeated cross-validation, and statistical testing, providing stronger evidence of model reliability under varying data distributions.

The novelty of this study lies in reframing banana damage classification as a robustness-oriented problem rather than a purely accuracy-driven task. By integrating feature design, model diversity, and evaluation strategy into a unified framework, this work provides a more

reliable foundation for intelligent quality assessment systems in smart agriculture.

2. Research Methodology

This study presents a rigorously designed experimental framework for banana damage classification that emphasizes not only predictive performance but also statistical validity, robustness, and reproducibility. The methodology integrates structured data processing, texture-based feature representation, multi-model learning, and advanced validation strategies to ensure reliable and generalizable results.

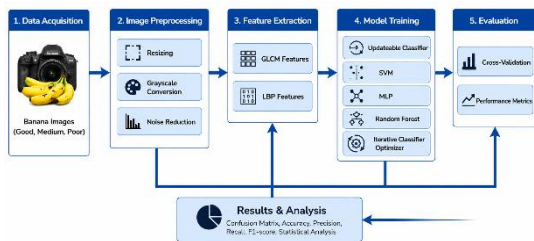


Fig. 1 illustrates the overall workflow of the proposed banana damage classification framework, consisting of five main stages: data acquisition, image preprocessing, feature extraction, model training, and evaluation.

As in **Fig. 1** the first stage, banana images representing different levels of damage (good, medium, and poor) are collected under controlled conditions to ensure consistency and reliability of the dataset. These images serve as the input for the entire classification pipeline.

The second stage involves image preprocessing, where all images are resized to a standardized resolution, converted to grayscale, and enhanced through noise reduction techniques. This step aims to minimize irrelevant variations such as lighting conditions while

preserving essential structural and texture information.

In the feature extraction stage, texture-based descriptors are computed to represent surface characteristics associated with banana damage. Specifically, Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) features capture statistical texture properties, while Local Binary Patterns (LBP) encode fine-grained local texture variations.

The extracted features are then used as inputs for multiple machine learning models in the model training stage. Five classifiers with different learning mechanisms are evaluated, including an updateable multiclass classifier, Sequential Minimal Optimization (SMO), Multilayer Perceptron (MLP), Iterative Classifier Optimizer, and Random Forest.

Finally, the evaluation stage assesses model performance using cross-validation and standard classification metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score. The results are aggregated and analyzed to determine model effectiveness, stability, and generalization capability.

2.1 Dataset and Problem Formulation

Images were captured using a Nikon D750 digital camera equipped with a 50 mm lens. The camera settings were fixed at ISO 800, shutter speed 1/200 s, and aperture f/4.0 to maintain image consistency.

All images were collected under controlled indoor lighting conditions with illumination levels ranging between 1000–1500 lux. Bananas were positioned on a uniform white background at an approximate distance of 50 cm from the camera. Images were acquired from a frontal perspective to ensure consistency in texture appearance and bruise visibility.

The final dataset consisted of 568 images with a resolution of 615×440 pixels.

A total of 568 banana images were collected and categorized into three damage levels: good (203), medium (218), and poor (147) as show in **Fig. 2**.

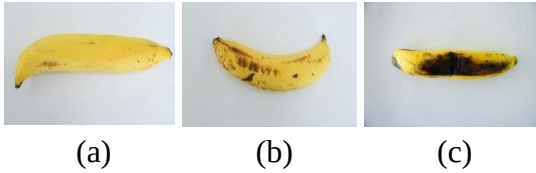


Fig. 2 illustrates examples of banana photographs (a) good, (b) medium, and (c) poor used in this work.

Table 1 Banana Damage Classification Criteria

Class	Description	Surface Damage
Good	Fresh peel, no visible bruises	<5%
Medium	Moderate bruising or discoloration	5–20%
Poor	Severe bruising and visible deterioration	>20%

Image labeling was independently performed by three agricultural experts with experience in fruit quality assessment. Disagreements were resolved through discussion and consensus. Inter-rater agreement was assessed using Cohen's Kappa coefficient, yielding $\kappa = 0.87$, indicating strong agreement.

The classification criteria were adapted from post-harvest banana quality assessment studies and agricultural grading guidelines.

The banana damage classification task is defined as a multi-class classification problem as equation (1):1q

$$f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathcal{Y}$$

$$\mathcal{Y} \in \{1, 2, 3\} \quad (1)$$

where $\mathbb{R}^d$ = feature space with d dimensions

$\mathcal{Y}$ = set of class labels

1 = Good

2 = Medium

3 = Poor

f = learned classification function

Let

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in \mathbb{R}^d \quad (2)$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, y_i \in \mathcal{Y} \quad (3)$$

where X = feature matrix

Y = label vector

n = number of samples (568 images)

2.2 Image Preprocessing

A standardized preprocessing pipeline was applied to ensure consistency and reduce irrelevant variability:

- **Resizing:** $I \in \mathbb{R}^{615 \times 440}$
- **Grayscale transformation:** Reduces dimensionality and lighting sensitivity.
- **Noise reduction and enhancement:** Improves edge and texture visibility.

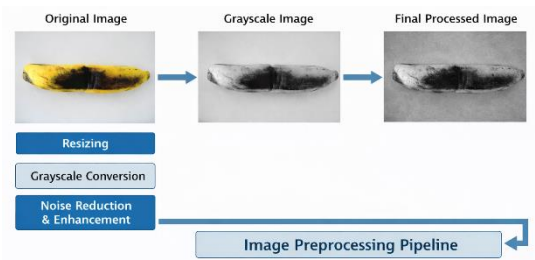


Fig. 3 Image preprocessing pipeline applied to banana images, including resizing, grayscale conversion, and noise reduction and enhancement for improving texture representation.

2.3 Feature Extraction

Texture features are extracted from I_e to form feature vector x_i . The GLCM descriptor generated 16 texture features derived from four statistical measures (contrast, correlation, energy, and homogeneity) computed across four orientations (0°, 45°, 90°, and 135°). The LBP descriptor generated a 256-bin histogram. Consequently, the final feature vector consisted of 272 dimensions.

2.3.1 Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM)

GLCM is defined as equation (4):

$$P(i, j) = \frac{\text{number of occurrences of } (i, j)}{\sum_{i, j} \text{occurrences}} \quad (4)$$

where i, j = gray-level intensities

$P(i, j)$ = normalized co-occurrence probability

From $P(i, j)$, the following features are computed:

- **Contrast**

$$\text{Contrast} = \sum_{i, j} P(i, j) (i - j)^2 \quad (5)$$

- **Correlation**

$$\text{Correlation} = \sum_{i, j} \frac{(i - \mu)(j - \mu)P(i, j)}{\sigma^2} \quad (6)$$

- **Energy**

$$\text{Energy} = \sum_{i, j} P(i, j)^2 \quad (7)$$

- **Homogeneity**

$$\text{Homogeneity} = \sum_{i, j} \frac{P(i, j)}{1 + |i - j|} \quad (8)$$

where μ = mean intensity

σ^2 = variance

2.3.2 Local Binary Patterns (LBP)

$$\text{LBP}(x_c, y_c) = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c) \cdot 2^p \quad (8)$$

where (x_c, y_c) = center pixel

g_c = intensity of center pixel

g_p = intensity of neighboring pixel

P = number of neighbors

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Algorithm 1: Feature Extraction Pipeline

Input:

I = Input RGB image
 d = distance parameter for GLCM
 θ = set of angles for GLCM (e.g., {0°, 45°, 90°, 135°})
 P = number of neighbors for LBP
 R = radius for LBP

Output:

x = Feature vector (GLCM + LBP)

Begin

1: Resize image $I \rightarrow I_r$
 2: Convert I_r to grayscale $\rightarrow I_g$

// --- GLCM Feature Extraction ---

3: Initialize GLCM matrix $P(i, j) = 0$
 4: For each angle θ_k in θ do
 5: Compute co-occurrence matrix $P_k(i, j)$ using distance d and angle θ_k

6: Normalize $P_k(i, j)$

7: Extract features:

8: Contrast_k = $\sum P_k(i, j) * (i - j)^2$

9: Correlation_k = $\sum ((i - \mu)(j - \mu) * P_k(i, j)) / \sigma^2$

10: Energy_k = $\sum (P_k(i, j))^2$

11: Homogeneity_k = $\sum P_k(i, j) / (1 + |i - j|)$

12: End For

13: Aggregate GLCM features over all angles $\rightarrow F_glcm$

// --- LBP Feature Extraction ---

14: For each pixel (x_c, y_c) in I_g do

15: For $p = 0$ to $P-1$ do

16: Compare neighbor intensity g_p with center g_c

17: If $g_p \geq g_c$ then $s_p = 1$ else $s_p = 0$

18: End For

19: Compute LBP(x_c, y_c) = $\sum s_p * 2^p$

20: End For

21: Compute histogram of LBP values $\rightarrow F_lbp$

// --- Feature Vector ---

22: Concatenate F_glcm and $F_lbp \rightarrow x$

Return x

End

Fig. 4 Pseudo Code texture-based feature using GLCM and LBP for representing banana surface damage patterns.

2.4 Model Learning

Each classifier learns a mapping:

$$\hat{y} = f(x; \theta) \quad (9)$$

where x = feature vector

θ = model parameters

$\hat{y}$ = predicted label

Table 2 Hyperparameter Settings

Model	Parameters
Random Forest	100 trees, max depth = unlimited
SMO	Polynomial Kernel (degree = 2)
MLP	Hidden layers = 100-50
Updateable Classifier	Default Weka parameters
Iterative Classifier Optimizer	Iteration = 100

Hyperparameters were determined through preliminary experiments and validation performance to ensure fair comparison among classifiers. The selected classifiers represent diverse learning paradigms. SMO represents margin-based learning, Random Forest represents ensemble tree learning, MLP represents neural network-based learning, the Updateable Classifier supports incremental learning, and the Iterative Classifier Optimizer represents iterative optimization-based classification. This diversity enables a comprehensive investigation of feature-model compatibility.

2.5 Performance Evaluation

2.5.1 Confusion Matrix Components

- TP = True Positive
- FP = False Positive
- TN = True Negative
- FN = False Negative

2.5.2 Metrics

- **Accuracy**

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (10)$$

- **Precision**

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (11)$$

- **Recall**

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (12)$$

- **F1-score**

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

2.6 Cross-Validation

Repeated Stratified k -Fold:

$$k = 5, r = 3$$

$$Total\ runs = k \times r \quad (14)$$

where k = number of folds

r = number of repetitions

2.7 Statistical Analysis

- Mean and Standard Deviation:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (16)$$

where μ = mean performance

σ = standard deviation

- **ANOVA**

$$F = \frac{\text{variance between groups}}{\text{variance within groups}} \quad (17)$$

Used to test statistical significance.

Algorithm 2: Model Training and Evaluation Framework

Input:

X = Feature matrix ($n \times d$)

Y = Label vector ($n \times 1$)

M = Set of models {M1, M2, M3, M4, M5}

S = Set of data split configurations

{(50/10/40), (60/10/30), (70/10/20), (80/10/10)}

k = number of folds ($k = 5$)

r = number of repetitions ($r = 3$)

Output:

Performance metrics for each model:

Accuracy, Precision, Recall, F1-score (mean $\pm$ SD)

Begin

Algorithm 2: Model Training and Evaluation Framework

```

// --- Multi-Split Evaluation ---
1: For each split configuration  $s \in S$  do
2:   Partition dataset  $(X, Y) \rightarrow \text{Train}_s, \text{Val}_s, \text{Test}_s$ 

3:   For each model  $M_j \in M$  do
4:     Train model  $M_j$  on  $\text{Train}_s$ 
5:     Tune hyperparameters using  $\text{Val}_s$ 
6:     Predict labels  $\hat{Y}$  on  $\text{Test}_s$ 

7:   Compute metrics:
8:     Accuracysj
9:     Precisionsj
10:    Recallsj
11:    F1sj
12:   End For
13: End For

// --- Cross-Validation ---
14: For each model  $M_j \in M$  do
15:   Initialize results list  $R_j = \emptyset$ 

16:   For repetition  $t = 1$  to  $r$  do
17:     Perform stratified k-fold split on  $(X, Y)$ 

18:     For fold  $i = 1$  to  $k$  do
19:       Train  $M_j$  on training folds
20:       Test  $M_j$  on validation fold

21:     Compute metrics:
22:       Acci, Preci, Reci, F1i

23:     Append results to  $R_j$ 
24:   End For
25: End For

26: Compute mean and standard deviation:
27:    $\mu_j = \text{mean}(R_j)$ 
28:    $\sigma_j = \text{std}(R_j)$ 
29: End For

// --- Statistical Testing ---
30: Perform ANOVA on model performances  $\{\mu_j\}$ 
31: If significant ( $p < 0.05$ ) then
32:   Perform Tukey HSD post-hoc test
33: End If

Return all metrics and statistical results

End

```

Fig. 5 Pseudo Code model training and evaluation framework.

3. Results and Discussion

3.1 Performance Overview and Theoretical Interpretation

The comparative performance of all models under different data split configurations is summarized in Table 3.

The results are reported in terms of Accuracy and F1-score, reflecting both overall correctness and class balance.

Table 3 Performance comparison across different data split configurations

Model	50/10/40	60/10/30	70/10/20	80/10/10
Updateable	87.45 /	89.12 /	90.35 /	91.11 /
Classifier	0.86	0.88	0.90	0.91
SMO	85.22 /	87.10 /	88.75 /	89.30 /
(SVM)	0.84	0.86	0.88	0.89
MLP	83.90 /	86.40 /	88.10 /	89.00 /
	0.82	0.85	0.87	0.88
Random	82.75 /	83.90 /	84.60 /	85.20 /
Forest	0.81	0.83	0.84	0.85
Iterative	80.40 /	82.10 /	83.30 /	84.00 /
Optimizer	0.79	0.81	0.83	0.84

Performance improves consistently with increasing training data size, confirming the theoretical relationship:

$$\varepsilon_{gen} \propto \frac{1}{\sqrt{n}}$$

where n is the number of training samples. The updateable classifier shows the most significant gain, indicating strong adaptability to richer feature distributions.

3.2 Cross-Validation and Stability Analysis

To ensure robustness, repeated stratified k-fold cross-validation was applied. The results are summarized in Table 4.

Table 4 Cross-validation results (mean $\pm$ standard deviation)

Model	Accuracy (%)	F1-score
Updateable	90.72 $\pm$ 0.85	0.90 $\pm$ 0.01
Classifier		
SMO	88.95 $\pm$ 1.10	0.88 $\pm$ 0.02
(SVM)		

Model	Accuracy (%)	F1-score
MLP	88.40 ± 1.85	0.87 ± 0.03
Random Forest	84.90 ± 1.25	0.84 ± 0.02
Iterative Optimizer	83.70 ± 1.40	0.83 ± 0.02

The updateable classifier exhibits the lowest variance (σ), indicating superior stability. In contrast, MLP shows higher variability, suggesting sensitivity to training data distribution and initialization.

3.3 Statistical Significance Analysis

To validate whether performance differences are statistically meaningful, ANOVA and Tukey HSD tests were conducted.

Table 5 ANOVA results

Source	F-value	p-value
Model Comparison	12.87	< 0.001

Since $p < 0.05$, differences between models are statistically significant.

Table 6 Tukey HSD (pairwise comparison)

Comparison	p-value	Result
Updateable vs RF	< 0.001	Significant
Updateable vs Iterative	< 0.001	Significant
Updateable vs SMO	0.041	Significant
SMO vs MLP	0.231	Not significant

The top-performing model is not only better numerically but also statistically superior.

3.4 Confusion Matrix and Error Analysis

The normalized confusion matrix for the best-performing model is shown in Fig. 6.

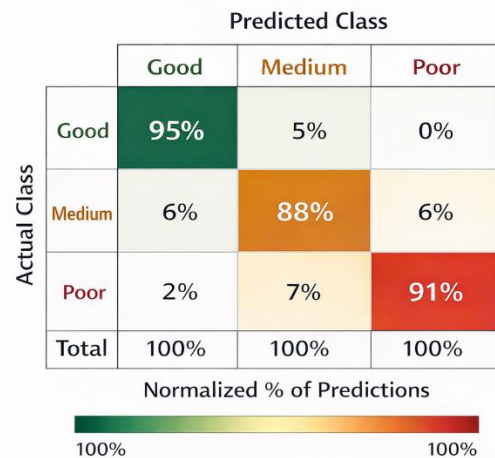


Fig. 6 Confusion matrix of the best-performing model (normalized %).

Most misclassifications occur between Medium and Poor classes:

$\exists x_i, x_j$ such that $y_1 \neq y_j$ but $\|x_i - x_j\| \approx 0$. This confirms that **feature overlap** exists in the high-dimensional space. The confusion matrix indicates that the Good class achieved the highest classification reliability, with 95% correctly classified samples. The largest confusion occurred between Medium and Poor classes, where 6–7% of samples were incorrectly assigned. This behavior suggests that texture descriptors extracted from transitional damage stages share similar statistical properties, resulting in overlapping feature distributions.

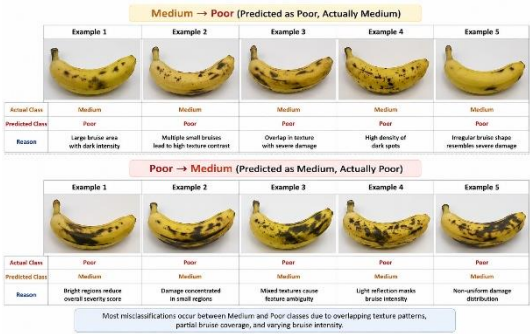


Fig. 7 Examples of Misclassified Samples

Most misclassified samples exhibited mixed texture characteristics, where bruised regions occupied only a partial area of the banana surface. Such cases create feature overlap between Medium and Poor categories, making class separation more challenging.

3.5 Feature–Model Compatibility Analysis

From GLCM:

$$Contrast = \sum P(i,j)(i - j)^2$$

From LBP:

$$LBP = \sum s(g_p - g_c) \cdot 2^p$$

These produce:

$$x \in \mathbb{R}^d \text{ with continuous variation}$$

Thus, the classification function must satisfy:

$$f(x) \text{ is smooth and continuous}$$

Table 7 Model Characteristics and Computational Efficiency

Model Type	Decision Boundary	Performance	Avg. Processing Time (s/image)
Updateable / SVM	Smooth	High	0.008
MLP	Non-linear (data dependent)	Medium	0.015

Model Type	Decision Boundary	Performance	Avg. Processing Time (s/image)
Random Forest	Piecewise constant	Lower	0.006

In addition to classification performance, computational efficiency was evaluated to assess practical deployment feasibility. Experimental results showed that the average feature extraction time using GLCM and LBP was approximately 0.12 s per image. Classification times for the Updateable Classifier, MLP, and Random Forest were below 0.02 s per image. These results indicate that the proposed framework can support near real-time banana quality assessment in smart agricultural environments.

3.6 Theoretical Interpretation of Model Behavior

Random Forest:

$$f(x) = \frac{1}{T} \sum h_t(x)$$

where $h_t(x)$ are discontinuous functions mismatch with feature space.

Updateable Model:

$$f(x) \approx \text{continuous mapping}$$

Better alignment with feature structure to higher performance.

3.7 Key Findings and Contributions

This study demonstrates that: Model performance is governed by feature model compatibility.

rather than: model complexity

3.8 Practical Implications

- Suitable for **automated grading systems**
- Robust under **varying data conditions**
- Scalable for **smart agriculture deployment**

3.9 Comparison with Related Studies

Study	Method	Accuracy
Al-Dairi et al. (2024)	Fractal-based	85.6
Chaowalittawin et al. (2025)	Lightweight CNN	89.2
Proposed Framework	GLCM + LBP + ML	91.11

The proposed framework achieved higher classification accuracy than several recent banana quality assessment studies while requiring substantially lower computational resources than deep learning approaches.

5. Conclusion

This study proposed a robust machine learning framework for banana damage classification based on image preprocessing and texture-based feature extraction. The framework integrates Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) and Local Binary Pattern (LBP) descriptors with multiple machine learning classifiers and a comprehensive evaluation strategy, including multi-split validation, repeated cross-validation, and statistical significance testing. This design provides a reliable approach for assessing

banana quality beyond conventional accuracy-oriented evaluations.

The experimental results demonstrated that the Updateable Multiclass Classifier achieved the best performance among all evaluated models, reaching an accuracy of 91.11% and an F1-score of 0.91. The model consistently outperformed the other classifiers across different data split configurations while maintaining stable performance under repeated validation experiments.

This work contributes a reproducible and evaluation-driven framework for intelligent agricultural quality assessment. By systematically investigating the relationship between texture-based feature representation and classifier behavior, the findings indicate that model effectiveness depends more on feature-model compatibility than model complexity. The proposed framework therefore provides a practical and computationally efficient solution for automated banana grading and post-harvest quality inspection in smart agriculture environments.

Future research will focus on expanding the dataset with more diverse samples collected under real-world agricultural conditions. In addition, deep learning-based feature extraction techniques and hybrid learning frameworks will be investigated to further improve classification performance, robustness, and adaptability. The integration of the proposed approach into real-time smart agriculture systems will also be explored to support large-scale automated quality assessment applications.

6. References

- [1] M. Al. Dairi, P. B. Pathare, R. Al-Yahyai, H. Jayasuriya, and Z. Al-Attabi, "Banana fruit bruise detection using fractal dimension based image processing," *Food Chemistry*, vol. 455, 2024,
- [2] L. C. Jiménez, B. Vintimilla, and S. Velastin, "A review of external quality inspection for fruit grading using CNN models," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 14, pp.1-20, 2024,
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Digital transformation in action – FAO digital for impact 2022*, Rome, Italy: FAO, 2023.
- [4] J. Han, T. Li, Y. He, and Q. Gao, "Using machine learning approaches for food quality detection," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, pp. 1–9, 2022.
- [5] J. D. Hounsinnou, P. Houngue, and M. Richy, "Digital Solutions for Fruit Maturity Estimation: A Bibliometric Analysis," in *Proceeding of the 2025 5th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Paris, France, 2025, pp. 1-10,
- [6] M.i Sinha, D. Sharma, P. Porasar, K. N. Dutta, and K. Kaushik, "Ensuring Quality in Fruits and Vegetables: Strategies and Tools," in *Proceeding of the Computational Intelligence and Image Processing in Agriculture: Applications and Innovations*, IEEE, 2026, pp.143-154,
- [7] M. Wu, Z. Choffin, L. KONG, H. LEE, S. Sun, and N. Jeong, "Noninvasive Microwave Imaging and Machine Learning to Assess Ripeness of Avocados," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 6, no. 1, pp. 273-284, 2025.
- [8] Z. M. Choffin, L. Kong, Y. Gan and N. Jeong, "A CNN-Based Microwave Imaging System for Detecting Watermelon Ripeness," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 21413-21421, 2025.
- [9] S. H. M. Ashtiani, S. Javanmardi, M. Jahanbanifard, A. Martynenko, and F. J. Verbeek, "Detection of Mulberry Ripeness Stages Using Deep Learning Models," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 100380-100394, 2021.
- [10] C. S. Nandi, B. Tudu, and C. Koley, "A Machine Vision Technique for Grading of Harvested Mangoes Based on Maturity and Quality," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 16, pp. 6387-6396, 2016.
- [11] A. Bonkra, S. Pathak, and A. Kaur, "Exploring Dataset for Apple Leaf Disease Detection," *Smart Agritech: Robotics, AI, and Internet of Things (IoT) in Agriculture*, pp.419-441, 2024.
- [12] N. Chumuang, M. Ketcham, T. Ganokratanaa, P. Pramkeaw, J. Chongsri, and W. Yimyam, "Sorting Red and Green Chilies by Digital Image Processing," in *Proceeding of the 2023 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI)*, phetchaburi, Thailand, 2023, pp. 1-7.

- [13] V. Chaowalittawin, W. Krungseanmuang, P. Sathaporn, F. Morita, T. Archevapanich, and B. Purahong, "Banana quality classification using lightweight CNN model with microservice integration system," *Engineering and Applied Science Research*, vol. 52, no. 4, pp. 430–438, 2025.
- [14] S. Chang, M. Zhang, D. Kong, and A. S. Mujumdar, "Artificial intelligence-driven postharvest quality control of fruit and vegetable products: Intelligent detection, optimization strategies and application prospects," *Food Bioscience*, vol. 74, 2025.
- [15] D. Shao and N. Marwa, "Examining the role of artificial intelligence in post-harvest management for enhanced food security: A critical review," *Sustainable Futures*, vol. 10, 2025.
- [16] Z. Li, D. Wang, T. Zhu, Y. Tao, and C. Ni, "Review of deep learning-based methods for non-destructive evaluation of agricultural products," *Biosystems Engineering*, vol. 245, pp. 56–83, 2024.

การศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านความร้อนในท่อเกลียวต่างองศา

กฤตยชญ์ ชันธหัตถ์ ปรีดา จันทวงษ์ และ ชัยยศ ดำรงกิจโกศล*

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

รับบทความ 11 พฤษภาคม 2569 แก้ไขบทความ 17 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 26 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

การมองหาพลังงานหมุนเวียนหรือการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพในปัจจุบันมีแนวโน้มการศึกษาวิจัยเพิ่มขึ้น ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอุตสาหกรรมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นไปด้วย การเพิ่มสมรรถนะของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่ง ที่สามารถลดการใช้พลังงาน รวมทั้งลดขนาด น้ำหนักและพื้นที่ในการติดตั้งด้วย งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและรูปแบบการไหลของน้ำร้อนในท่อเกลียวต่างองศา โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวท่อเป็นฟลักซ์คงที่และทำการปรับองศาเกลียวตามองศาที่ต้องการศึกษา ลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านความร้อนในท่อเกลียว ได้แก่ 30, 60 และ 90 องศา ในอัตราการไหล 20, 40 และ 60 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าเกิดลักษณะการไหลแบบ turbulent flow ขึ้น เมื่อเกิดการไหลในท่ออยู่ในช่วง $Re > 4000$ ท่อเกลียวที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดได้แก่ท่อเกลียว 30 องศาเมื่อเปรียบเทียบกับองศาอื่นๆ และท่อเปล่าภายในผิวเรียบและท่อเกลียว 30 องศาที่อัตราการไหล 20, 40 และ 60 ลิตรต่อนาทีท่อเกลียว 30 องศา มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมากกว่าท่อเปล่าภายในผิวเรียบ 18.89%, 18.30% และ 18.83% ตามลำดับ

คำสำคัญ : การพาความร้อน; ฟลักซ์คงที่; ลักษณะการไหล; ท่อเกลียว; สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1458 0155, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th

Study of the Characteristics of Heat Transmission in Spiral Pipes of Different Degrees

Krittayot Kuntahut Preeda Chanthawong and Chaiyot Damrongkijkosol*

College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok, 10800

Received 11 May 2026; Revised 17 June 2026; Accepted 26 June 2026

Abstract

Presently, there is an escalating research trend focused on renewable energy exploration and energy efficiency optimization. Rapid advancements in industrial technologies have concurrently led to a substantial increase in global energy consumption. Consequently, enhancing the performance of heat exchangers represents a viable strategy to mitigate energy consumption while simultaneously minimizing the physical size, weight, and installation footprint of the equipment. This study investigates the heat transfer characteristics and fluid flow behavior of hot water within twisted tubes configured at distinct angles. Experiments were conducted under a constant wall heat flux condition. The specific thermal transport characteristics were evaluated by adjusting the twist angles to 30, 60, and 90 degrees, utilizing volumetric flow rates of 20, 40, and 60 liters per minute at a constant temperature of 50 degrees Celsius. The experimental results indicate that turbulent flow occurs within the tubes when the Reynolds number exceeds 4,000 ($Re > 4,000$). Comparatively, the 30-degree twisted tube exhibited the highest heat transfer coefficient among all tested configurations, including the conventional smooth tube. Specifically, at flow rates of 20, 40, and 60 liters per minute the 30-degree twisted tube enhanced the convective heat transfer coefficient by 18.89%, 18.30%, and 18.83%, respectively, relative to the smooth tube.

Keywords : Heat transfer; Constant flux; Characteristics of Flow; Spiral pipe; Heat transfer coefficient

* Corresponding Author. Tel.: +668 1458 0155, E-mail Address: chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th

1. บทนำ

อุปกรณ์ด้านการถ่ายเทความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากทั้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมด้วยปัญหาด้านพลังงานในปัจจุบันที่มีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถทำงานได้เทียบเท่าหรือสูงกว่าเดิมโดยที่ใช้พลังงานลดลงได้รับความสนใจกันอย่างมากแพร่หลายนอกจากนี้ยังมีนโยบายจากทางภาครัฐสนับสนุนเพื่อแก้ปัญหาด้านพลังงานในอนาคต ซึ่งการพัฒนาประสิทธิภาพท่อส่งผ่านความร้อนจะช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องจักรและลดการปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศดังนั้นผู้จัดทำได้ศึกษาบทความวิจัยต่างๆเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อนภายในท่อและการ จำแนกงานวิจัยออกเป็นสองส่วน ดังเช่นงานวิจัยเกี่ยวกับการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการส่งผ่านความร้อนภายในท่อและงานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองหาผลลัพธ์ภายในท่อ P. B. Dehankar et al. [1] ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมด้วยการใส่ครีบริบรูปหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสามเหลี่ยม ในปีถัดมา Z. Xu et al. [2] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นกั้นรูปตัวยู งานวิจัยต่อมา M. M. Benmbarek and S. F. Moujaes [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่ประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ จากอัตราส่วนแผ่นปิดเกลียวเจาะรูสี่เหลี่ยมหลายช่อง

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แผ่นกั้นรูปปีกสามเหลี่ยมตัววี (V-shaped delta-wing baffle turbulators) ซึ่งช่วยสร้างการไหลวนและเพิ่มการผสมของของไหล ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น โดย P. Samruaisin et al. [4] และ S. Zhang et al. [5] นอกจากนี้ L. Wang et al. [6] ได้ศึกษาการจัดวางแผ่นปิดเกลียวแบบเยื้องศูนย์กลาง (off-center placement) เพื่อวิเคราะห์ผลต่อการไหลและการ

ถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลม พบว่าตำแหน่งการติดตั้งแผ่นปิดเกลียวส่งผลต่อการเกิดการไหลวน การรบกวนชั้นขอบเขตความร้อน และสมรรถนะการพาความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

การส่งผ่านความร้อนในท่อเกลียวต่างองศา โดยประยุกต์ใช้การออกแบบภายในท่อที่แตกต่างกันเพื่อหาผลลัพธ์ โดยแบบจำลองสำหรับการส่งผ่านความร้อนที่เลือกนำมาใช้ประกอบด้วยวิธีการจำลองท่อเปล่าภายในผิวเรียบความยาว 1 m. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ เลขนัสเซิลต์ ตัวประกอบ ความเสียดทาน ความเร็ว ความดันตกคร่อม และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งท่อยาว 1 m. โดยมีเงื่อนไขการทดลองเดียวกันโดยทำการทดลองที่สภาวะผิวท่อเป็นฟลักซ์คงที่และทำการปรับองศาเกลียวตามองศาที่ต้องการศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านความร้อนในท่อเกลียว ได้แก่ 30, 60 และ 90 องศา ในอัตราการไหล 20, 40 และ 60 L/min ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษา ลักษณะเฉพาะรูปแบบการไหลของน้ำในท่อสเตนเลส SUS 316 ที่มีผิวภายในเรียบ OD 0.0254 m. และ ID 0.0221 m.

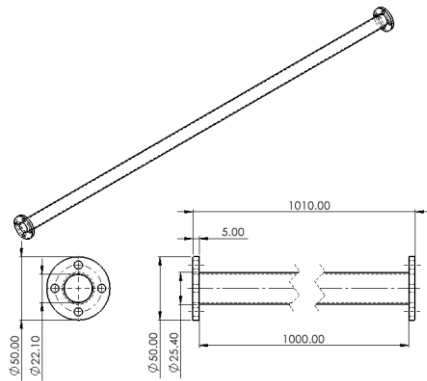
2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้เริ่มด้วยการศึกษาข้อมูลการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการส่งผ่านความร้อนในท่อที่มีลักษณะคล้ายๆกันเพื่อนำมาอ้างอิงถึงการออกแบบเกลียวในรูปแบบที่เป็นองศาการออกแบบด้วยการขึ้นรูปสามมิติและทำการตั้งค่าการจำลองต่างๆด้วยการปรับแต่งค่าในโปรแกรมการจำลองสามมิติ การคัดเลือกและกำหนดกรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ผลเชิงลึก ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบบจำลองและทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของท่อเกลียวทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ มุม 30, 60 และ 90 องศา

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

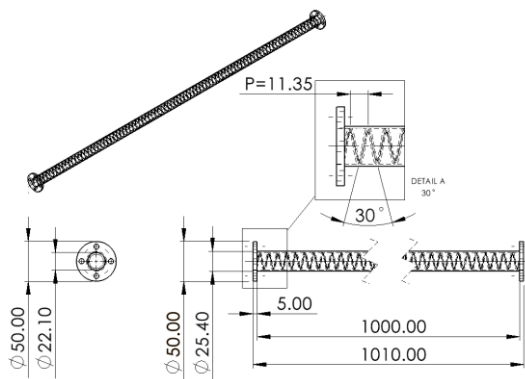
1. ทำการออกแบบท่อเปล่าภายในผิวเรียบขนาด

OD 0.0254 m., ID 0.0221 m., L = 1 m. ดังรูปที่ 1

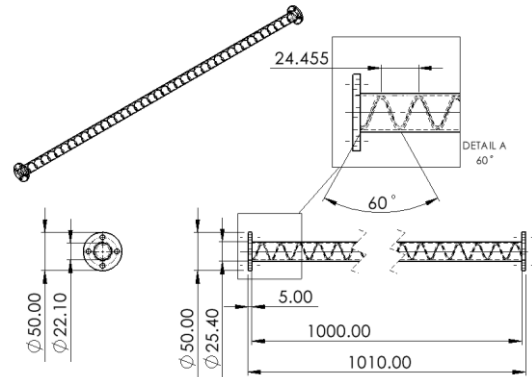


รูปที่ 1 การออกแบบท่อเปล่าภายในผิวเรียบ

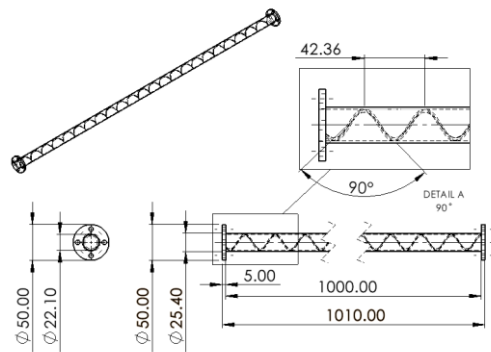
2. ทำการออกแบบเกลียวพันรอบภายในท่อ 30, 60 และ 90 องศา ตามลำดับ ขนาด OD 0.0254 m., ID 0.0221 m., L = 1 m. ทั้งนี้ การกำหนดขอบเขตของมุมองศาเกลียวที่ช่วงห่างที่ละ 30 องศา มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ครอบคลุมลักษณะทางเรขาคณิตหลัก โดยกำหนดให้ท่อเปล่าผิวเรียบทำหน้าที่เป็นตัวแทนของมุม 0 องศา และมุม 90 องศาเป็นขีดจำกัดสูงสุดทางเรขาคณิต การแบ่งช่วงดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้ม ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและตัวประกอบความเสียหายได้อย่างชัดเจนและเป็นระบบ สอดคล้องกับแนวทางการศึกษาในวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลของการจำลองดังรูปที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 2 ท่อเกลียว 30 องศา



รูปที่ 3 ท่อเกลียว 60 องศา



รูปที่ 4 ท่อเกลียว 90 องศา

3. ตั้งค่าเงื่อนไข วัสดุเป็นสแตนเลส SUS316 (ASTM) อุณหภูมิน้ำขาเข้า 50 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวท่อเป็นฟลักซ์คงที่ความหนาผิว 0.3 μm โดยที่อัตราการไหล 20, 40 และ 60 L/min ในการกำหนดอุณหภูมิน้ำขาเข้าคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิการทำงานปกติที่สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงของระบบ แลกเปลี่ยนความร้อนทางอุตสาหกรรม และระบบนำความร้อนที่ระดับต่ำกลับมาใช้ใหม่ (Low-grade Waste Heat Recovery) ซึ่งมักถูกใช้เป็นช่วงอุณหภูมิอ้างอิงในการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนและกลศาสตร์ของอุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังที่ A. M. Abed et al. [7] ได้รายงานไว้ เพื่อมุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะเชิงพลังงานภายใต้สภาวะที่สอดคล้องกับการใช้งานจริง

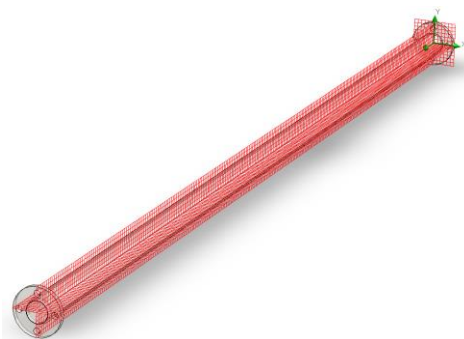
ทั้งนี้ การกำหนดสภาวะอุณหภูมิขาเข้าคงที่ซึ่งเป็นแนวทางมาตรฐานในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและการไหลภายในท่อ โดยช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรทางเรขาคณิตและสภาวะการไหลได้อย่างเป็นระบบภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่ชัดเจนตามหลักการตั้งแบบจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและของไหลที่นำเสนอโดย S. V. Patankar [8] การเลือกใช้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสยังช่วยรักษาเสถียรภาพของคุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ของของไหล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความคลาดเคลื่อนทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขตามทฤษฎีพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนของ C. Upadhyay and S. K. Singh [9] อีกทั้งการควบคุมอุณหภูมิในระดับดังกล่าวยังเป็นการจำกัดขอบเขตการจำลองให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขการไหลสถานะเดียว โดยหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเปลี่ยนสถานะ (Phase Change) หรือการเกิดพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนเกินกว่าโครงสร้างสมการดั้งเดิมของ T. L. Bergman et al. [10] ส่งผลให้แบบจำลองเชิงตัวเลขมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือสูง

4. ตั้งค่าความละเอียดของการจำลอง

การตั้งค่าความละเอียดของด้วย 2 วิธี คือ การตั้งค่าแบบครอบคลุมทั้งชิ้นงาน (Global Mesh) และการควบคุมเฉพาะจุดที่สำคัญ (Local Mesh) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและประหยัดเวลาในการคำนวณมากที่สุด J. H. Lienhard IV & V [11]

การตั้งค่าความละเอียดของตาข่าย (Mesh) ในระบบจำลองนี้ ใช้เทคนิคผสมผสานระหว่าง**การควบคุมความละเอียดภาพรวม (Global Mesh)** เพื่อกำหนดระดับโครงสร้างพื้นฐานของชิ้นงาน ร่วมกับการควบคุมความละเอียดเฉพาะจุด (Local Mesh Control) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ในบริเวณวิกฤต เช่น ผิวหน้าสัมผัสแคบ ส่วนขอบ หรือจุดที่ความเร็วของไหลเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เทคนิคนี้ช่วยให้แบบจำลอง

สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำในจุดสำคัญ โดยไม่สร้างภาระในการประมวลผลมากเกินไป ดังรูปที่ 5 และ 6

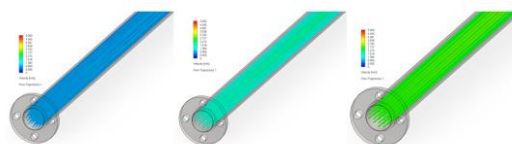


รูปที่ 5 ความละเอียดต่อเปล่งภายในผิวเรียบ

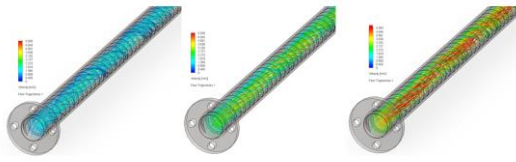


รูปที่ 6 ความละเอียดต่อเกลียว 30 องศา

การจำลองโดยใช้การควบคุมความละเอียด ทั้งสองรูปแบบด้วยการตั้งค่าแบบครอบคลุมทั้งชิ้นงาน (Global Mesh) และการควบคุมเฉพาะจุดที่สำคัญ (Local Mesh) ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 ท่อเปล่งภายในผิวเรียบ อัตราการไหล 20, 40, และ 60 L/min ตามลำดับ



รูปที่ 8 ท่อเกลียว 30 องศา อัตราการไหล
20, 40 และ 60 L/min ตามลำดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและสมการที่ใช้ในการคำนวณแนวคิดพื้นฐานของการพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล โดยการโอนถ่ายพลังงานความร้อนจะอาศัยการแพร่ ของโมเลกุลของของไหล C. Upadhyay and S. K. Singh และ K. Chen et al. [9], [12] การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

การพาความร้อนตามธรรมชาติและการพาความร้อนโดยบังคับ คือ การเคลื่อนไหวของของไหล ซึ่งได้รับผลจากแรงกระทำจากภายนอก

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ แบบการไหลของของไหล สามารถพิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) การพัฒนาของชั้นขอบเขตความเร็ว ชั้นขอบเขตความร้อน สามารถพิจารณาตัวเลขพรันด์เทิล (Pr) ลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวของแข็ง

การวิเคราะห์เชิงมิติรวมกับผลการทดลองยังส่งผลต่อการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน คือ สมบัติของของไหลและลักษณะเฉพาะของการไหล ได้แก่

สภาพนำความร้อน (k , $W/m \cdot K$)

ความหนาแน่น (ρ , kg/m^3)

ความหนืดสัมบูรณ์ (μ , $Pa \cdot s$)

ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p , $J/kg \cdot K$)

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (β , K^{-1})

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและการไหล

ตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number) หรือสมบัติการไหล โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างสภาพแพร่ทางโมเมนต์ตัมต่อสภาพแพร่ทางความร้อน C. Upadhyay and S. K. Singh, S. M. Ammar and C. Park [9], [13]

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho C_p} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1)$$

แบบของการไหลพิจารณาจากค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) Çengel & Cimbala (2018), S. K. Singh and A. Kumar (2025), F. M. White (2021) [14, 15, 16]

$$Re = \frac{\rho u l_c}{\mu} = \frac{u l_c}{\nu} \quad (2)$$

โดยที่

u คือความเร็วของของไหล (m/s)

l_c คือความยาวสำคัญ (m)

ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

μ คือความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล ($Pa \cdot s$)

ν คือความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงพาคำนวณจากสมการของกนีลินสกี (Gnielinski Correlation) ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายสำหรับการไหลปั่นป่วนภายในท่อ และให้ความแม่นยำที่ดีโดยเฉพาะในช่วงการไหลกึ่งปั่นป่วนถึงปั่นป่วน (Transitional to Turbulent Flow) ตามที่ได้อธิบายไว้โดย F. P. Incropera et al. [17] ทั้งนี้ความเหมาะสมของสมการดังกล่าวสำหรับการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อเพิ่มสมรรถนะ

ได้รับการยืนยันจากผลการศึกษาของ Ammar and Park [13]

$$3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$$

จะถูกคำนวณผ่านสมการที่ (3)

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (3)$$

สมการฮาแลนด์ (Haaland Equation) ซึ่งเป็นสูตรประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของดาร์ซี (Darcy Friction Factor, f) [17] ใช้สำหรับคำนวณการสูญเสียพลังงานจากการไหลของของไหลภายในท่อกลมแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

$$f = \frac{1}{\{-1.8 \log_{10}[(\frac{e/d}{3.7})^{1.11} + (\frac{6.9}{Re})]\}} \quad (4)$$

(f) : สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของดาร์ซี (Darcy friction factor)

(Re) : เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) เพื่อระบุลักษณะการไหล

(e/d) ความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อ (Relative roughness)

โดย

e คือความสูงของความขรุขระบนผิวท่อ

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำพา (Convection Heat Transfer Coefficient: (h)) คือค่าตัวแปรทางวิศวกรรมที่ใช้วัดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหล (ของเหลวหรือแก๊ส) ที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิว ยิ่งค่า (h) สูงมากเท่าใด อัตราการระบายหรือแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะยิ่งรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่านั้น

ตามกฎการทำให้เย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ค่า (h) จะถูกจำกัดความและคำนวณผ่านสมการพื้นฐาน N. Dokmai et al. [18] ดังนี้

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q, W)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำพา ($h, W/m^2 \cdot K$)

พื้นผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของไหล (A, m^2)

อุณหภูมิที่พื้นผิวของวัตถุแข็ง (T_s)

อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไป (Free-stream temperature) (T_∞)

5. บันทึกผลการจำลองจากโปรแกรมการจำลองตัวแปรต่างๆจากผลการจำลองและอภิปรายผล

6. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองเชิงตัวเลข จัดทำตารางสรุปข้อมูล และกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

6.1 การศึกษาเปรียบเทียบท่อเกลียวที่มุมองศาแตกต่างกัน เปรียบเทียบท่อเกลียวมุม 30, 60 และ 90 องศา เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มเชิงเรขาคณิตและคัดเลือกมุมที่ให้สมรรถนะดีที่สุด

6.2 การศึกษาเปรียบเทียบเชิงลึกกับท่อเปล่าผิวเรียบ นำท่อเกลียวมุมที่ดีที่สุดที่คัดเลือกได้ (มุม 30 องศา) มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพร่วมกับท่อเปล่าผิวเรียบ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อน

6.3 เปรียบเทียบ Relative Error จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ตามทฤษฎีการคำนวณและผลจากการจำลอง

7. สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการณ์การไหลของน้ำภายในท่อเกลียวต่างองศา

ผ่านการจำลองเชิงตัวเลข ผลการศึกษาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 3.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของท่อเกลียวที่มีมุม 30, 60 และ 90 องศา และ 3.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างท่อเกลียวมุม 30 องศา กับท่อภายในผิวเรียบ โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของท่อเกลียวที่มีมุม 30, 60 และ 90 องศา

การจำลองเชิงตัวเลขของท่อผิวเรียบเปรียบเทียบกับท่อเกลียวมุม 30 องศา ที่อัตราการไหล 20, 40 และ 60 L/min ผลการวิเคราะห์แยกตามพฤติกรรมหลักได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองและผลลัพธ์การหาประสิทธิภาพด้วยท่อเปล่าภายในผิวเรียบ การเปรียบเทียบท่อเกลียว 30 องศา, ท่อเกลียว 60 องศา และท่อเกลียว 90 องศา

Flowrate	ท่อเกลียว 30 องศา			ท่อเกลียว 60 องศา			ท่อเกลียว 90 องศา		
อัตราการไหล (L/min)	20	40	60	20	40	60	20	40	60
Velocity : (V)	1.057	2.149	3.238	1.0410	2.128	3.207	0.9764	1.9861	2.9912
(ความเร็วในการไหล) (m/s)									
Dynamic Viscosity : (μ)	0.00055	0.00055	0.00055	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
(ความหนืดไดนามิก) ($Pa \cdot s$)									
Convection Coefficient : (h)	12500.23	18941.45	26424.89	12324	18787	26210	11630	17766	24769
(สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)									
($W/m^2 \cdot K$)									
Reynolds Number : (Re)	46148	93813	141356	45433	92869	139949	42616	86683	130552
(ตัวเลขเรย์โนลด์)									
Friction factor : (f)	0.02493	0.0181	0.0166	0.0245	0.0181	0.0166	0.0252	0.0183	0.0168
(ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน)									
Prandtl number : (Pr)	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61
(เลขพรันด์เทิล)									
Nusselt Number : (Nu)	476.3	721.7	1006.9	469.6	715.8	998.7	443.1	677.0	943.8
(ตัวเลขนัสเซลต์)									

จากการจำลองเชิงตัวเลข (ตารางที่ 1) แสดงว่า ท่อเกลียวมุม 30 องศา มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในทุกสภาวะทดสอบ โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สูงกว่ามุม 60 และ 90 องศา คิดเป็นร้อยละ 1.43 และ 7.48 ที่อัตราไหล 20 60 L/min ($12,500.23 W/m^2 \cdot K$), ร้อยละ 0.82 และ 6.62 ที่อัตราไหล 40 60 L/min ($18,941.45 W/m^2 \cdot K$) และร้อยละ 0.82 และ 6.68 ที่อัตราไหลสูงสุด 60 L/min ($26,424.89 W/m^2 \cdot K$) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามได้ความสมดุลเชิงที่น้อยกว่าช่วยชักนำของไหลให้

มีวนตัวเกิดกระแสน้ำวนควงสว่วน และคงสภาพความปั่นป่วนได้เต็มที่ ส่งผลให้มวลของไหลผสมผสานรุนแรงและลดความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน ได้ดีที่สุดต่างจากมุม 60 และ 90 องศา ที่ชั้นเกินไปจนเกิดกระแสน้ำวนแยกตัวที่ไม่เป็นระบบ บริเวณหลังแนวเกลียว ในด้านกลศาสตร์แรงเสียดทาน (f) ของมุม 30 และ 60 องศาจะใกล้เคียงกัน (0.024–0.016) แต่มุม 90 องศา กลับสูงที่สุดในทุกกรณี (0.0252, 0.0183 และ 0.0168) เพราะแนวเกลียวตั้งชันขวางทิศทางการไหลหลักโดยตรง จึงสรุปได้ว่า

ท่อเกลียวมุม 30 องศาเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจริง เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการพาความร้อนสูงสุด โดยไม่เพิ่มภาระแรงต้านทานการไหลในระบบ

3.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างท่อเกลียวมุม 30 องศา กับท่อเปล่าภายในผิวเรียบ

ผลการจำลองและผลลัพธ์การหาประสิทธิภาพด้วยการเปรียบเทียบตามเงื่อนไขของท่อเปล่าภายในผิว

เรียบกับท่อเกลียว 30 องศา ซึ่งมุ่งเน้นท่อเกลียวมุม 30 องศาเนื่องจากจากการประมวลผลและวิเคราะห์ผลการจำลองในเบื้องต้นพบว่า โครงสร้างเรขาคณิตของท่อเกลียวทำมุม 30 องศา เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนและการควบคุมความสูญเสียทางกลศาสตร์ในระบบดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำลองและผลลัพธ์การหาประสิทธิภาพด้วยการเปรียบเทียบตามเงื่อนไขของท่อเปล่าภายในผิวเรียบกับท่อเกลียว 30 องศา

Flowrate อัตราการไหล (L/min)	ท่อเปล่าภายในผิวเรียบ			ท่อเกลียว 30 องศา		
	20	40	60	20	40	60
Fluid density : (ρ) (ความหนาแน่นของของไหล) (kg/m^3)	987.45	987.45	987.45	987.45	987.45	987.45
Velocity : (V) (ความเร็วในการไหล) (m/s)	0.8732	1.7464	2.6196	1.0573	2.1494	3.2388
Diameter : (D) (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ)	0.0221	0.0221	0.0221	0.0221	0.0221	0.0221
Dynamic Viscosity : (μ) (ความหนืดไดนามิก) ($Pa \cdot s$)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Convection Coefficient : (h) (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) ($W/m^2 \cdot K$)	10514.36	16,010.77	22237.75	12500.23	18941.45	26424.89
Reynolds Number : (Re) (ตัวเลขเรย์โนลด์)	38110	76222	114332	46148	93813	141356
Friction factor : (f) (ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน)	0.0255	0.0188	0.0173	0.0249	0.0181	0.0166
Prandtl number : (Pr) (เลขพรันด์เทิล)	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61
Nusselt Number : (Nu) (ตัวเลขนัสเซลต์)	400.633	610.065	847.335	476.301	721.734	1006.880

การจำลองเชิงตัวเลขของท่อผิวเรียบเปรียบเทียบกับท่อเกลียวมุม 30 องศา ที่อัตราการไหล 20, 40 และ 60 L/min ผลการวิเคราะห์แยกตามพฤติกรรมหลักได้ดังนี้

สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Convective Heat Transfer Performance) ท่อเกลียวมุม 30 องศา มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบในทุกอัตราการไหลดังรูปที่ 9

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สูงกว่าคิดเป็น ร้อยละ 18.89, 18.30 และ 18.83

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction Factor) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ของท่อทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงโดยท่อเกลียวมุม 30 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าท่อผิวเรียบเล็กน้อยในทุกสภาวะ 0.0249, 0.0181 และ 0.0166 ดังรูปที่ 10

พฤติกรรมการไหล (Fluid Flow Behaviour) ค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ของท่อผิวเรียบอยู่ในช่วง 38,110–114,332 และท่อเกลียวมุม 30 องศาอยู่ในช่วง 46,148–141,356 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทุกเงื่อนไขมีลักษณะ เป็นการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่ ($Re > 4000$) ส่งผลให้ของไหลผสมตัวกันได้ดียิ่งขึ้นดังรูปที่ 11

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลด์ (Nu) กับอัตราการไหลของท่อเปล่าผิวเรียบเปรียบเทียบกับท่อเกลียวมุม 30 องศา ผลการจำลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ค่าเลขนัสเซิลด์ของท่อทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างเป็นระบบ โดยท่อเกลียวมุม 30 องศา สามารถยกระดับค่าเลขนัสเซิลด์ให้สูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบได้อย่างชัดเจนในทุกช่วงอัตราการไหล และให้ค่าสูงสุดถึง 1,006.88 ดังแสดงดังรูปที่ 12

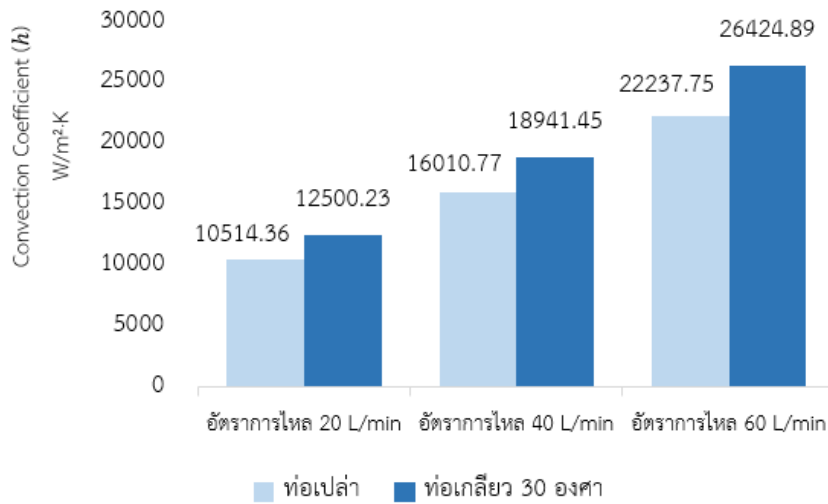
ความแม่นยำจากการเปรียบเทียบเลขเรย์โนลด์ระหว่างค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีและค่าจากการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกัน

ความสอดคล้องจากการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อเกลียวต่างองศาผ่านการจำลองเชิงตัวเลข พบว่าท่อเกลียวมุม 30 องศา มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง โดยสามารถยกระดับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ให้สูงกว่าท่อเปล่าผิวเรียบได้สูงสุดถึงร้อยละ 18.89 ที่อัตราการไหล 20 L/min ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. M. Benmbarek et al. [3] ที่ระบุว่า ลักษณะเรขาคณิตของอุปกรณ์ปั่นป่วนของไหลจะช่วยรบกวนและลดความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน บริเวณผิวท่อ โดยน้ำในท่อเกลียวมุม 30 องศา จะถูกชักนำให้วนตัวเกิดกระแสนวนควงส่ววนและคงสภาพความปั่นป่วนได้เต็มที่ ส่งผลให้มวลของไหลระหว่างแกนกลางและบริเวณใกล้ผนังท่อเกิดการผสมผสานกันอย่างรุนแรง ซึ่งแนวความคิดการเพิ่มสมรรถนะด้วยการสร้างกระแสไหลวนนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ P. B. Dehankar et al. [1] ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่ามุมลาดเอียงที่น้อย (30 องศา) จะส่งผลดีต่อการจัดเรียงทิศทางการไหลที่เป็นระบบมากกว่ามุมที่ชันเกินไป (60 และ 90 องศา) ในด้านชลศาสตร์ ผลการจำลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ของท่อเกลียวมุม 30 องศา มีแนวโน้มลดลงและมีค่าต่ำกว่าท่อเปล่าผิวเรียบเล็กน้อยในทุกสภาวะ (อยู่ในช่วง 0.0249 ถึง 0.0166)

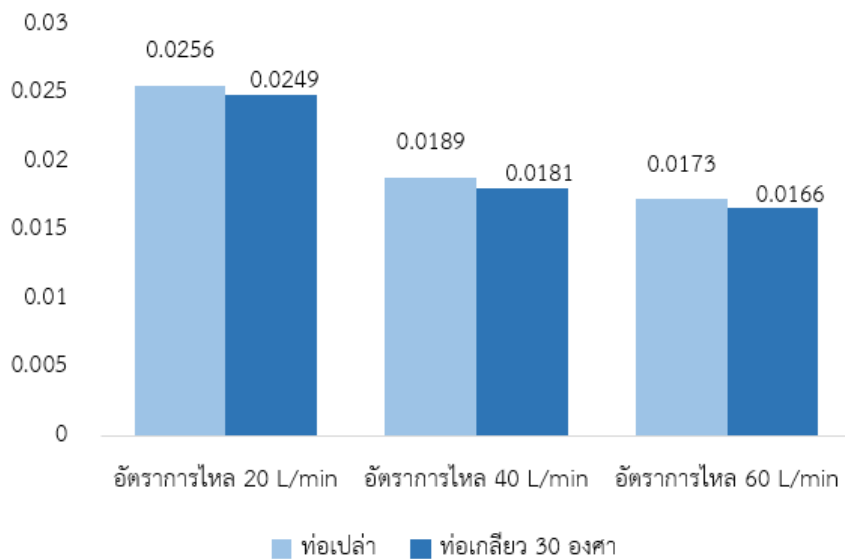
นอกจากนี้ เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องของแบบจำลอง การวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ที่ได้จากการจำลองคอมพิวเตอร์กับค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี ผลการทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) คงที่อยู่ที่ร้อยละ 9.94 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ และผลลัพธ์นี้สอดคล้องอย่างสมบูรณ์กับกรอบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการตั้งค่าความละเอียดตาข่าย (Mesh)

ตามหลักการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลของ A. N. Ilkan [19] และ M. H. Fagr et al. [20] ซึ่งการผสมผสานระหว่างการควบคุมความละเอียดภาพรวม (Global Mesh) และการควบคุมเฉพาะจุดวิกฤต

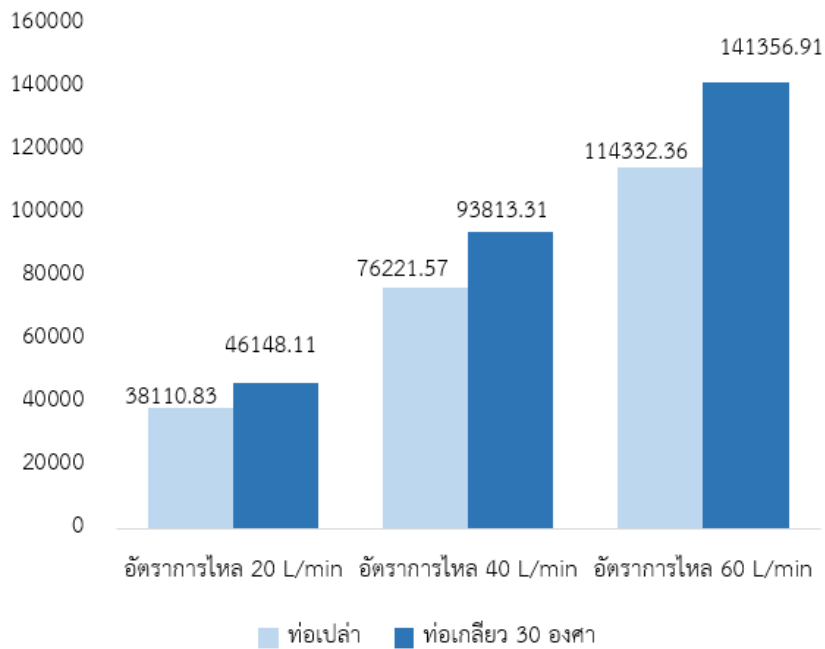
(Local Mesh) บริเวณผิวหน้าสัมผัสแคบ ช่วยให้แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่ ($Re > 4000$) ตามทฤษฎีทางชลศาสตร์สากล [19], [20]



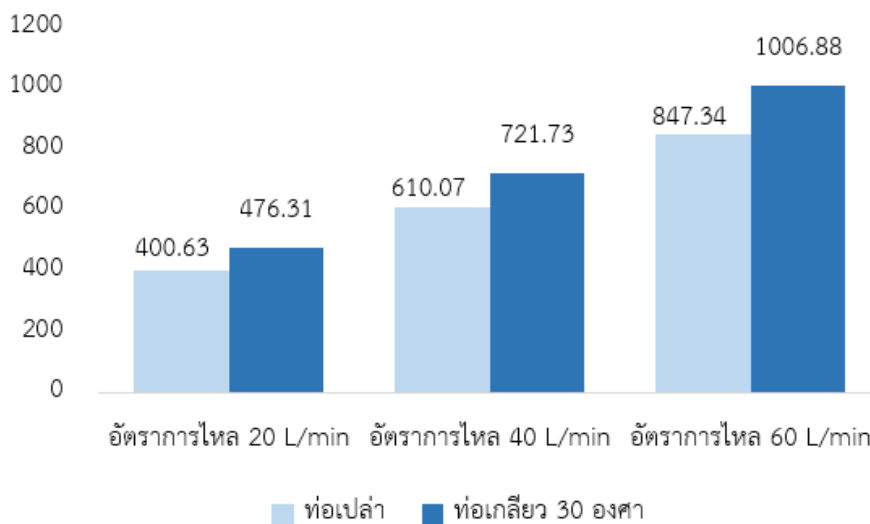
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) กับอัตราการไหลของท่อเปล่าภายในผิวเรียบ เปรียบเทียบกับท่อเกลียว 30 องศา



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับอัตราการไหลของท่อเปล่าภายในผิวเรียบ เปรียบเทียบกับท่อเกลียว 30 องศา



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) กับอัตราการไหลของท่อเปล่าภายในผิวเรียบ
เปรียบเทียบกับท่อเกลียว 30 องศา



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซิลต์ (Nu) กับอัตราการไหลของท่อเปล่าภายในผิวเรียบ
เปรียบเทียบกับท่อเกลียว 30 องศา

การทดสอบ Relative error (%) จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ด้วยทฤษฎีจากคุณสมบัติน้ำอุณหภูมิเข้า 50°C ($\rho = 988 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 5.5 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) และมีความเร็วในการไหล (V) และขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางท่อ (D) ตามการแสดงผลการจำลองในตารางที่ 2 และเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองด้วยโปรแกรมการจำลองตามตารางแสดงผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Relative Error (%) จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

Flowrate อัตราการไหล (L/min)	ท่อเปล่าภายในผิวเรียบ			ท่อเกลียว 30 องศา		
	20	40	60	20	40	60
Reynolds Number : (Re) (ตัวเลขเรย์โนลด์จากการคำนวณทฤษฎี)	34665	69330	103996	41976	85331	128577
Reynolds Number : (Re) (ตัวเลขเรย์โนลด์จากผลการจำลอง)	38110	76222	114332	46148	93813	141356
Relative Error (%)	9.94	9.94	9.94	9.94	9.94	9.94

จากการเปรียบเทียบค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี อ้างอิงคุณสมบัติน้ำอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส กับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในสภาวะท่อเปล่าผิวเรียบและท่อเกลียวมุม 30 องศา ในอัตราการไหล 20, 40 และ 60 L/min พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันอย่างเป็นระบบ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์คงที่อยู่ที่ร้อยละ 9.94 ในทุกเงื่อนไขการจำลอง

4. สรุป

จากการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมไหลของน้ำภายในท่อเกลียวต่างองศาด้วยการจำลองเชิงตัวเลข พบว่า ท่อเกลียวมุม 30 องศาเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเกลียวมุม 60 และ 90 องศา โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าเลขนัสเซิลต์สูงที่สุดในทุกสภาวะการไหลที่ศึกษา ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในระดับเหมาะสม สะท้อนว่าโครงสร้างเกลียวมุม 30 องศาสามารถส่งเสริมการผสมของของไหลและการרבกวนชั้นขอบเขตความร้อนได้ดีกว่ารูปแบบอื่น

เมื่อนำท่อเกลียวมุม 30 องศาไปเปรียบเทียบกับท่อเปล่าภายในผิวเรียบ พบว่าท่อเกลียวให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าร้อยละ 18.89, 18.30 และ 18.83 ที่อัตราการไหล 20, 40 และ 60 ลิตรต่อวินาที ตามลำดับ พร้อมทั้งให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงกว่ำอย่างชัดเจนในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่าการปรับเรขาคณิตภายในท่อสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านพฤติกรรมกรไหล ผลการจำลองแสดงว่าทุกกรณีมีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยโครงสร้างเกลียวช่วยชักนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนภายในท่อ ส่งผลให้ของไหลบริเวณแกนกลางและใกล้ผนังท่อเกิดการผสมตัวกันได้ดียิ่งขึ้น ขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อเกลียวมุม 30 องศา ยังคงอยู่ในระดับต่ำ เมื่อเทียบกับท่อเปล่าภายในผิวเรียบ ซึ่งเป็นผลดีต่อการลดการสูญเสียพลังงานในระบบ

ผลการเปรียบเทียบค่าเลขเรย์โนลด์จากการคำนวณทางทฤษฎีกับผลการจำลองพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ร้อยละ 9.94 ในทุกกรณีศึกษา สะท้อนว่าผลการจำลองมีความเที่ยงตรงและเป็นไปตามกรอบการวิเคราะห์ที่กำหนดไว้

5. References

- [1] P. B. Dehankar, K. Joshi, V. A. Bhosale, and R. N. Mulik, "Assessment of twist tape thermal performance in heat transfer passive augmentation technique," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [2] Z. Xu, X. Ning, R. Li, X. Wan, and C. Zhao, "Configuration Optimization of a Shell-and-Tube Heat Exchanger with Segmental Baffles Based on Combination of NSGAI and MOPSO Embedded Grouping Cooperative Coevolution Strategy," *Processes*, vol. 11, no. 11, 2023.
- [3] M. M. Benmbarek and S. F. Moujaes, "CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement for Twisted Tape Inserted in Spirally Corrugated Tubes and Proposal of a New Vane-Inserted Geometry," *Fluids*, vol. 10, no. 3, 2025.
- [4] P. Samruaisin, R. Maza, C. Thianpong, V. Chuwattanakul, N. Maruyama, M. Hirota, and S. Eiamsa-ard, "Enhanced Heat Transfer of a Heat Exchanger Tube Installed with V-Shaped Delta-Wing Baffle Turbulators," *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023.
- [5] S. Zhang, L. Lu, and Q. Wang, "Thermal-hydraulic characteristic of short-length self-rotating twisted tapes in a circular tube," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 122, 2021.
- [6] L. Wang, P. Ni, and G. Xi, "The effect of off-center placement of twisted tape on flow and heat transfer characteristics in a circular tube," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021.
- [7] A. M. Abed, B. S. Chauhan, H. Ayed, A. Mouldi, I. Mahariq, M. A. Abdelkareem, and M. Goodarzi, "Hydrothermal performance analyses of an isothermal tube with punched twisted tape turbulator (PTT)," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 57, 2024.
- [8] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.
- [9] C. Upadhyay and S. K. Singh, "Experimental Study of Heat transfer and friction factor in Double pipe Heat Exchanger using Twisted Tape with different groove angle of V-cut at constant depth," *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, vol. 10, no. 1, pp. 12-18, 2022.
- [10] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2018.
- [11] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 6th ed. Cambridge, MA, USA: Phlogiston Press, 2024.
- [12] K. Chen, H. I. Mohammed, J. M. Mahdi, A. Rahbari, A. Cairns, and P. Talebizadehsardari, "Effects of non-uniform fin arrangement and size on the thermal response of a vertical latent heat triple-tube heat exchanger," *Journal of Energy Storage*, vol. 45, 2022.
- [13] S. M. Ammar and C. Park, "Validation of the Gnielinski correlation for evaluation of heat transfer coefficient of enhanced tubes by non-linear regression model: An experimental study of absorption refrigeration system," *International*

- Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 118, 2020.
- [14] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
- [15] S. K. Singh and A. Kumar, “Experimental study of heat transfer and friction factor in a double pipe heat exchanger using twisted tape with dimple inserts,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 47, no. 4, pp. 7951–7980, 2025.
- [16] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2021.
- [17] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.
- [18] N. Dokmai, S. Eiamsa-ard, P. Mukda, and K. Nanan, “Heat transfer augmentation in a circular tube using V-wavy twisted tape,” *Agriculture and Technology Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 15–26, 2022.
- [19] A. N. Ilikan, “Heat transfer enhancement in a tube with a twisted tape inserted for various length ratios,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 2, pp. 3602–3616, 2023.
- [20] M. H. Fagr, H. M. Hasan, and Z. M. A. Alsulaiei, “Effects of acentric twisted tape on heat transfer and flow in tubes,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 75, 2025.

The Design of Visual Communication Barriers and Decoding Perceptions for Standardizing Signage for Deaf Drivers in Thailand

Voraphan Vorakitphan^{1*} and Nutch Pattananukit²

¹Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

²Communication Arts, Dhurakij Pundit University

¹86 Phitsanulok Rd, Suan Chitlada, Dusit, Bangkok, Thailand

²Prachachuen Road, Thung Song Hong, Lak Si District, and Bangkok, Thailand

Received 10 April 2026; Revised 20 June 2026; Accepted 26 June 2026

Abstract

The primary objective of this study is to establish a standardized safety framework by evaluating behavioral intent and semantic transparency through a mixed-methods approach. Structuring the study into three systematic phases, a target sample was selected via purposive sampling from the national population of 391,371 registered deaf individuals. The experimental sample comprised 20 participants, bifurcated into two distinct groups: licensed deaf drivers (n = 10) and general motorists (n = 10). Empirical testing was executed using semi-structured interviews in conjunction with a Virtual Reality (VR) driving simulation experiment under dynamic environmental conditions to rigorously measure participants' cognitive latency and reaction times. Crucially, empirical findings reveal that current disability stickers fail as "active safety signals" due to poor chromatic contrast and a lack of ergonomic semiotic linkage. General motorists consistently fail to decode their meaning often perceiving outdated materials as visually obstructive while qualitative insights indicate that a subset of deaf drivers (80.0%, n = 8 out of 10) exhibit a profound psychological reluctance to display static identifiers due to fears of harassment and criminal targeting once their status is publicly marked. To address these systemic failures, the study proposes a standardized visual signaling framework based on ISO 7010 and Universal Design principles. By optimizing chromatic contrast and utilizing situational LED activation, this proposed active system aims to minimize perceptual latency, ensuring critical traffic safety information is decoded instantaneously without compromising the user's anonymity.

Keywords : Visual Communication Engineering; Media Psychology; Cognitive Decoding; Traffic Signage Standards; Perceptual Latency

1. Introduction

In the framework of national infrastructure, the transportation industry and road safety serve as fundamental pillars driving economic mobility and enhancing the quality of life in Thailand [1]. As Thai society embraces diversity and social equity, transportation policies have evolved to uphold the dignity of marginalized groups. A significant paradigm shift occurred in 2005 when the Ministry of Transport amended regulations, granting hearing-impaired individuals the legal right to obtain personal driver's licenses [1]. This policy formally recognizes their cognitive driving capabilities, aligning with international social inclusion principles [2]. Current statistics reveal that over 50,000 hearing-impaired individuals hold driving licenses nationwide, a trend accelerated by the "Gig Economy" where deaf drivers increasingly participate in public transport and delivery services. However, a critical inter-driver communication gap persists; traditional road communication relies heavily on auditory cues, creating a high-risk environment for deaf drivers and leading to a significant information asymmetry [3].

From a Visual Communication Engineering perspective, Thailand currently operates within a technical semiotic vacuum [4], [5]. While basic industrial stickers exist, the system lacks effective signage aligned with communication engineering principles. Roadways instead feature self-produced

stickers or the misapplication of the International Symbol for Deafness (the crossed-ear icon). It functions by converting critical safety data into optimized visual signals matching human cognitive limits, ensuring that signs are immediately detected and processed under dynamic, high-speed driving conditions.

Currently, Thailand operates within a semiotic vacuum lacking standardized, official traffic signage for deaf drivers [4]-[6]. The road environment relies on self-produced stickers or the misapplication of the architectural "International Symbol for Deafness" (the crossed-ear icon). Placed in high-speed traffic, this symbol functions as "Miscontextualized Encoding". The use of blue psychologically associated with information rather than hazard fails to trigger the necessary cautionary response on the road, inducing "Semantic Blur" where other motorists decode critical safety alerts as mere decorative stickers [6].

This semantic blur and interpretation failure catalyze road accidents involving deaf drivers, leading to rising localized rear-end collisions and sideswipes. When critical auditory alerts like emergency honking go unacknowledged, the lack of "Semantic Transparency" in current stickers prevents trailing motorists from transitioning to visual alternatives or maintaining safe braking distances [3]. Consequently, surrounding drivers fail to timely

recognize vehicle communication constraints, triggering abrupt braking and multi-vehicle crashes. Per Stuart Hall's model [3], [7], [8], non-transparent signals fail to elicit a rapid "Dominant Reading". Furthermore, deviating from ISO 7010 warning schemas by substituting yellow-black with blue introduces severe "Semantic Noise" [9].

Despite global advancements in external Human-Machine Interfaces (eHMI) [4], there remains a research gap in Thailand concerning the media psychology of driver stimuli, particularly for those operating within the high-speed gig economy [5].

To mitigate these hazards, human factors literature demonstrates that standardized, mathematically optimized symbols significantly eliminate cognitive processing delays. Traffic signage engineering research reveals that signs utilizing precise stroke widths and high-contrast, yellow-and-black triangular geometries according to international safety standards drastically optimize driver comprehension. Empirical studies indicate that such engineering configurations successfully reduce a motorist's perception-reaction time (T_r) well below the critical 2.0-second safety threshold, providing trailing drivers with sufficient braking margins to prevent rear-end collisions.

Despite global advancements in external Human-Machine Interfaces (eHMI) [4], Thailand's media psychology regarding driver stimuli remains under-

researched [5]. To eliminate these communication blind spots, this study analyzes the sender-to-receiver cognitive process to transition informal stickers into a policy-backed "Signage Engineering System". The research targets three systematic phases: investigating decoding barriers and perceptual noise, analyzing design element encoding and connotative meanings, and proposing optimized information transmission guidelines to minimize communication failures, ultimately enhancing road safety and social equity in Thailand.

2. Research Methodology

The research methodology is designed as a pilot study employing a stimulus-based research approach, focusing on improving visual communication efficiency for deaf drivers. It employs a Multidisciplinary Approach, integrating Visual Engineering, Behavioral Science, and Communication Arts to address the limitations of existing traffic symbols. To fully operationalize this framework, the study extensively expands upon the concept of Active Visual Light, specifically focusing on the mechanism of Situational LED Activation. This mechanism serves as the primary technical tool, engineered to deliver dynamic, real-time visual stimuli that adapt to critical road scenarios. By embedding this situational activation within the design, the methodology

directly bridges engineering controls with behavioral science, thereby maximizing cognitive conspicuity and optimizing the behavioral responses of deaf drivers under high-stakes conditions.

Population and Target Sample

The target population encompasses registered deaf individuals in Thailand ($N = 391,371$) and licensed general motorists. Given the laboratory-controlled nature of this human factors experiment, a total sample of 20 participants was selected via purposive sampling, equally bifurcated into deaf drivers ($n = 10$) and general motorists ($n = 10$). To ensure internal validity, all subjects met strict inclusion criteria, including a minimum of 2 years of driving experience and normal or corrected 20/20 visual acuity.

Regarding statistical representation in human factors engineering, this study adopts a Quasi-Experimental Laboratory Design (Human-in-the-loop simulation) rather than a broad social survey. According to established ergonomic testing paradigms, a sample size of $n = 10$ per distinct experimental cohort (10 licensed deaf drivers and 10 general motorists) provides sufficient data saturation to ensure high Internal Validity. This localized cohort size allows for rigorous, repeated-measures validation under stringently controlled environmental variables, making it mathematically valid for evaluating

mechanical reaction times and cognitive sensory limits.

2.1 Research Processes

This study employed a mixed-methods approach combining a quasi-experimental laboratory design with qualitative research methods. The research was executed through three systematic phases as follows:

Phase 1: Planning and Problem Identification (Planning)

The primary objective was established to mitigate road-based information asymmetry. Via purposive sampling from Thailand's population of 391,371 registered deaf individuals (Department for Empowerment of Persons with Disabilities, 2022), the experimental sample was bifurcated into licensed deaf drivers and general motorists, supplemented by traffic signage experts and graphic designers. Questionnaires and structured interviews elicited in-depth perceptual challenges to prioritize critical issues.

Phase 2: Documentary Research and Framework Development (Documentary Research)

A comprehensive review of academic literature, international standards specifically ISO 7010 and ISO 7001 (International Organization for Standardization, 2011, 2023) and traffic accident statistics was conducted. This

phase analyzed design components and cultural connotations using the semiotic frameworks of Roland Barthes (1972) and Stuart Hall (1980). These paradigms were integrated with Ware's (2020) Mental Imagery Theory to establish empirical design criteria and visual engineering proportions capable of rapidly stimulating driver risk imagery.

Phase 3: In-depth Interviews and Simulation Testing (In-depth Interview and Simulation)

Based on the derived design criteria, ten prototype signage variations were developed and evaluated using semi-structured interviews [9] alongside experimental manipulation. Visual stimuli were introduced within a dynamic Virtual Reality (VR) driving simulation to rigorously measure participants' behavioral intentions and perceptual delay. To perform quantitative latency analysis, each participant completed three designated trial blocks across different simulated road configurations, yielding 15 dynamic trials per participant to establish statistical reliability for percentage metrics and empirical reaction times.

Data Analysis

Qualitative interview data were transcribed verbatim via professional sign language interpreters. Content analysis utilized systematic coding to extract core themes. Ultimately, documentary data, interview insights, and empirical responses

from the VR simulation system were cross-examined through data triangulation to formulate effective standardization guidelines for safety signage.

2.2 Visual Communication

This phase compares the efficacy of current "Information" symbols (Blue/Square) against the proposed "Warning" model (Yellow/Triangle) based on ISO 7010 [4], [9], [10]. This transition in "Categorical Signaling" is engineered to maximize visibility, evaluating the signaling performance via the Conspicuity Index (CI) as formalized in equation (1) [10].

$$CI = \frac{C \cdot A}{V_b} \quad (1)$$

When

CI = Conspicuity Index

C = Contrast ratio between symbol and background

A = Surface area of the symbol (cm²)

V_b = Visual background clutter factor

Where CI represents the Conspicuity Index, C denotes the chromatic contrast coefficient, A represents the visual surface area of the physical signage, and V_b indicates the background visual noise. **Mathematically, CI exhibits a direct variation (proportionality) with contrast (C) and sign area (A), while exhibiting an inverse variation with background clutter (V_b).** > To standardize the engineering calculation across all simulated scenarios, the

physical surface area (A) was fixed as a numerical constant of $80 \times 10 \text{ cm}^2$, which serves as the minimum structural requirement for long-range detection distances exceeding 20 meters. In traffic engineering and vision science, the safe engineering **threshold criteria for a highly effective traffic sign requires a CI value of no less than the industry standard threshold**, ensuring that the target sign can instantaneously arrest driver attention amid dynamic visual disruptions.

Regarding the Engineering Communication ratio, this research strictly adheres to Visual Acuity Standards and Unity Scale Metrics (1 Meter) to optimize the Conspicuity Index (CI). Our proposed models are engineered using a calculated height-to-distance ratio of 2.5–3 cm per 10 meters to ensure maximum legibility, aligning with international ergonomics for accessibility [22] (ISO, 2023). For long-range detection (>20 m), we standardized the symbol area (A) at $80 \times 10 \text{ cm}^2$ to mitigate background clutter (V_b). By transitioning to a Yellow/Triangle (Warning) configuration, we intentionally maximize the contrast ratio (C), following global safety color protocols [21] (ISO, 2011) and accessibility standards for non-auditory cues [20]. TISI [24] addressed that in the Thai context, this design integrates the Thai Industrial Standard for safety colors. Furthermore, the placement and visibility parameters comply with the Ministry of Social Development and Human Security guidelines [23], ensuring that visual information effectively compensates for auditory limitations within Thailand's public infrastructure.

2.3 Behavioral Media Psychology and Semiotic Perception Decoding

We adopting a 'Proactive Communication Strategy' to measure Glance Legibility and reaction time (T_r) [11] against the 2.0-second safety threshold, this research demonstrates that despite the legal frameworks of the Empowerment of Persons with Disabilities Quality of Life Act and Universal Design, current DLT stickers suffer from a significant perception gap and semantic failure where the general public fails to decode their meaning, while many disabled drivers concurrently face a psychological barrier fearing that such symbols act as a mark of vulnerability that invites criminal targeting and social exploitation rather than enhancing safety [11], [13], [16] a multifaceted obstacle that necessitates a transition toward Active Visual Light Signals (Photonic Signaling) which utilize situational LED activation to ensure high-stakes communication during maneuvers while maintaining driver anonymity to mitigate security risks [12], [14], [19].



Fig. 1 Orange signage for deaf drivers in Thailand analyzed in this study.



Fig. 2 The Department of Land Transport (DLT) 'Disabled Driver' stickers on a vehicle.

Transitioning to dynamic Virtual Reality (VR) Simulation, this study evaluates the behavioral intent and semantic miscommunication of five selected stickers, identifying how visual noise and cognitive load affect decoding. Results indicate that while designs must adhere to the Empowerment of Persons with Disabilities Quality of Life Act and Universal Design principles, specifically “Equitable Use” and “Perceptible Information” current DLT stickers suffer from a severe perception gap and a psychological barrier regarding criminal targeting. This multifaceted obstacle necessitates a transition toward Active Visual Light Signals (Photonic Signaling) to ensure high-stakes communication while maintaining driver anonymity [11], [13], [16], [20].

3. Results and Discussion

The core concept of this study transitions from traditional static testing to a dynamic Virtual Reality (VR) Simulation to evaluate the Behavioral Intent and Semantic Transparency of five selected prototypes where Prototype 3 emerged as the superior design by achieving the lowest Mean Reaction Time (1.32s) demonstrating that while designs must adhere to the Empowerment of Persons with Disabilities Quality of Life Act, Universal Design (UD), and Visual Acuity Standards (2.5–3 cm height per 10 m), current DLT stickers suffer from a significant perception gap where the

general public fails to decode their meaning, while many disabled drivers concurrently face a psychological barrier regarding criminal targeting, a multifaceted obstacle that necessitates a transition toward Active Visual Light Signals (Photonic Signaling) to ensure high-stakes communication while maintaining driver anonymity [11], [13], [16], [20], [22].

Table 1 Evaluation criteria for five prototype symbols in a virtual reality (VR) simulation

Sticker ID	Design Concept
Prototype 1 	ISO 7010 Triangle (Yellow)
Prototype 2 	Circular Regulatory Style
Prototype 3 	High-Contrast Pictogram
Prototype 4 	Abstract Ear Symbol
Prototype 5 	Hybrid Text-Graphic

While Prototypes 1, 2, 4, and 5 failed to achieve rapid decoding due to high visual density, confusing regulatory shapes, and low-arousal color schemes, Prototype 3 emerged as the superior design by utilizing a high-contrast

triangular frame that maximizes semantic transparency, effectively reducing the mean reaction time to 1.32s and ensuring an instinctive safety response from general drivers [12], [15].



Fig. 3 VR Driving Simulation

environment layout. (Note: The user interface indicators “Enter Car” and “Exit Car” serve as **interactive UI hotspots** within the virtual laboratory environment, designed for participants to manually initiate or terminate the simulated traffic blocks before moving onto the open virtual road)



Fig. 4 First-person perspective of a driver encountering the ear-identity sticker.

The experimental procedure involves 20 participants navigating a standardized urban route within the VR environment. The five selected stickers optimized for Color Coding (Yellow-Black) and Geometric Coding (Triangle) were randomly placed on lead vehicles. The evaluation tools measured “Glance Legibility” (reaction within 1.5–2

seconds) and the distance recognition of each design under varying weather and light conditions.



Fig. 5 The experiments were conducted with the assistance of a sign language interpreter to ensure clear communication and accurate participant feedback.

3.1 Experimental Conditions

The simulation-based experiment is conducted under the following technical and procedural conditions:

Spatial Scaling and Visibility: All digital assets are calibrated to a 1:1 Unity Scale (1 Unit = 1 Meter). Symbol dimensions adhere to Visual Acuity Standards, ensuring a character height of 2.5–3 cm per 10 meters of viewing distance to maintain consistent legibility across all test phases.

Variable Distances: Participants are tested at three controlled longitudinal intervals: 1 meter, 5 meters, and 10 meters, simulating stationary, slow-moving, and following-distance traffic scenarios.

Visual Fidelity: To ensure high-quality data collection, prototypes utilize TextMeshPro for font clarity and Anisotropic Filtering to stabilize the Contrast Ratio (C) and Conspicuity Index (CI) at various viewing angles.

The simulation followed a structured five-stage protocol: Preparation, involving the development of 5 digital prototypes and virtual road environments; Introduction, to brief participants on visual cues and decoding rules; Simulation Action, providing real-time exposure to traffic scenarios to measure perception and response; Debriefing, to gather qualitative feedback on communication barriers; and Evaluation, a quantitative assessment of interpretation accuracy used to synthesize a national signage standard for deaf drivers.

3.2 Summary of Research Findings of Visual Communication and Perception

Given the restricted sample size per experimental cohort ($n_1 = 10$, $n_2 = 10$), a parametric One-Way ANOVA would violate the underlying normality assumptions of the data. Therefore, this study implemented the non-parametric Mann-Whitney U Test to accurately evaluate the statistical variance in perception-reaction times and decoding accuracy between licensed deaf drivers and general motorists.

The empirical results revealed severe visual communication barriers within the existing Department of Land Transport (DLT) safety signage (the traditional blue crossed-ear baseline). Under dynamic conditions, the baseline sign yielded a Mean Reaction Time (T_r) of 2.45 seconds, which significantly exceeds the recognized critical safety threshold of 2.0 seconds. Furthermore, its accuracy rate defined as the

percentage coefficient of correct semantic decoding that aligns with the intended safety warning was critically deficient at 42.5%. This low performance is directly attributed to its poor chromatic contrast and low semantic transparency; the blue-and-orange palette fails to trigger a cognitive cautionary schema, forcing motorists to rely on visual guesswork or misinterpret the signal as a non-critical decorative element.

Conversely, Prototype 3 engineered with a high-contrast yellow-and-black triangular geometry in accordance with ISO 7010 international standards demonstrated superior cognitive performance. The Mann-Whitney U test confirmed that Prototype 3 significantly optimized information transmission, drastically reducing the Mean Reaction Time (T_r) to 1.32 seconds, which is well within the safe breaking margin. Additionally, Prototype 3 achieved an accuracy rate of 92.5% among general motorists. This substantial improvement mathematically validates that integrating optimal visual stroke widths with universally recognized hazard geometries effectively eliminates semantic noise and accelerates cognitive imagery on the road, establishing the statistical justification for national signage standardization.

3.2.1 Limited Perception and Decoding Gaps Research

By adopting a Proactive Communication Strategy to measure Glance Legibility and reaction time (T_r) against the 2.0 seconds safety threshold

derived from AASHTO standards for collision avoidance this research demonstrates that despite the legal frameworks of the Empowerment of Persons with Disabilities Quality of Life Act and Universal Design, current DLT stickers suffer from a significant perception gap where the general public fails to decode their meaning, while many disabled drivers concurrently face a psychological barrier fearing that such symbols act as a mark of vulnerability that invites criminal targeting and social exploitation rather than enhancing safety [11]-[13], [16], [20], [22].

3.2.2 Psychological Dilemma: Safety vs. Vulnerability

A primary barrier to symbol adoption is the “Mark of Vulnerability” phenomenon. Deaf drivers face a psychological dilemma between complying with Department of Land Transport safety regulations and the risk of targeted crime. Interviews reveal that many avoid the symbol, fearing it signals an inability to communicate or call for help during emergencies, thus choosing anonymity over the safety benefits of visibility. Expressing this profound dilemma, a licensed deaf driver noted that while the sticker on the back of the car informs others of our hearing impairment when the car is parked in isolated areas or at night, we feel incredibly unsafe. The participant further elaborated

on this heightened vulnerability, stating, it feels like shouting to criminals that the driver of this vehicle is deaf. If an emergency occurs, it is much harder for us to report it or call for help compared to others. It turns us into a target for attack rather than enhancing our safety.

3.2.3 Contextual Noise and Accessibility Barriers

Communication efficacy is further hindered by Accessibility Noise. Inconsistent distribution of standardized stickers forces drivers to rely on non-standardized third-party versions, leading to variations in visual quality and clarity. In the modern ride-hailing context, while digital communication is prevalent, the physical sticker remains the last mile of visual signaling; its failure due to poor scaling or visibility frequently results in interpersonal conflict on the road.

Perception Gap and Visual Engineering Analysis Stimulate Base Research evaluation of the official orange-ear symbol reveals a significant limited perception among all road users, characterized by a rapid degradation in visibility beyond 5 meters. At a distance of 10 meters, perception by both deaf and general drivers drops to 0, directly violating the Engineering Visual Acuity Standard which requires objects to be legible at a height of 2.5-3 cm per 10 meters. For high-speed traffic situations (>20m), this

symbol's total lack of visibility (CI = 0) results in severe Accessibility Noise, increasing road risks. The failure is attributed to poor scaling and low visual Contrast Ratio (C) in the orange palette, which general drivers often misinterpret as context-based “Do Not Entry” cues rather than a “Warning” alert.

Table 2 Analysis of Design Elements, Perception Decoding, and Proposed Guidelines for Hearing-Impaired Driver Identity Symbols.

Observation Distance	Deaf Drivers (n=10)	General Drivers (n=10)	Visual Communication Barriers & Engineering Analysis
1 Meter	10 (100%)	10 (100%)	High chromatic glare; requires close proximity for legibility.
5 Meters	10 (100%)	10 (100%)	Perceptual threshold; edge contrast begins to degrade.
10 Meters	0 (0%)	0 (0%)	Total Visibility Failure. Does not meet the Visual Acuity Standard (2.5–3 cm height/10m).



Fig. 6 Demonstration of the simulation environment featuring the Department of Land Transport (DLT) Hearing-Impaired Driver stickers applied to the vehicle.

3.2.4 Visualizing Perception Data: DLT Deaf Driver Symbol Efficacy.

The provided graph visually represents the rapid decline in perception for the official Department of Land Transport (DLT) deaf driver symbol. This reinforces a key engineering failure in the symbol's design.

Table 3 Perception Performance (Percentage)

Viewing Distance	Deaf Drivers (n=10)	General Drivers (n=10)	Combined (n=20)
1 Meter	100%	100%	100%
5 Meters	100%	100%	100%
10 Meters	0%	0%	0%



Fig. 7 Simulation demonstrating the application of DLT Hearing-Impaired Driver stickers on a vehicle.

3.2.5 Synthesis of Qualitative and Engineering Findings

The study identifies a significant gap between deaf driver’s communication intent and the public’s decoding capability. While deaf drivers utilize symbols to mitigate road conflict, the primary barrier remains Semantic Failure, where other road users lack the awareness to interpret the official orange-ear icon, resulting in heightened safety risks. From

a design engineering perspective, this lack of clarity induces Psychological Noise, delaying the response time of surrounding drivers. To rectify this, symbols must be re-engineered to achieve a higher Conspicuity Index (CI), ensuring they are not only detectable but also immediately intuitive to the general public.

Furthermore, physical and visual limitations, such as insufficient scaling and poor visibility against vehicle window films, necessitate a transition toward high-performance materials. Current stickers fail to meet Visual Acuity Standards at long ranges, requiring a redesign that adheres to the TIS 635-2554 (Thai Industrial Standard) for reflective materials to optimize the Contrast Ratio (C). By adopting a Universal Design framework, the proposed symbol shifts the narrative from a warning sign that marks vulnerability to an information sign that fosters inclusive understanding, effectively bridging the gap between engineering functionality and social acceptance.

3.3 Engineering Communication and Perception Design

The efficacy of ear-identity stickers as an engineering communication tool depends on precise signal transmission between the sticker and motorists. To ensure rapid semantic decoding, the design must integrate Universal Design principles specifically perceptible information and comply with the

Empowerment of Persons with Disabilities Quality of Life Act's mandate for equitable use. Furthermore, adherence to ISO 7010 and Thai Industrial Standard (TIS 635) standards ensures that chromatic contrast and geometric cues effectively reduce perceptual latency, transforming a passive identifier into an active safety signal that triggers instantaneous driver responses [12], [20], [23].

3.3.1 VR Spatial Design and Symbol Scaling

To optimize the Conspicuity Index (CI), the spatial design within the Virtual Reality (VR) environment followed strict mathematical ratios. We utilized Unity Scale Metrics (1 Unit = 1m), the research established a standardized height-to-distance ratio of 2.5–3 cm per 10 meters. For detection at distances exceeding 20 meters, a symbol area (A) of 80 x 10 cm was utilized to mitigate background clutter (V_b). This engineering approach ensures that the visual noise inherent in driving environments does not overwhelm the signal, allowing for stable visual acuity even during high-speed movement in the simulation.

3.3.2 Comparative Analysis: Real-World vs. VR Observations

The research identified key correlations and distinctions between the VR environment and physical driving conditions. VR allowed for the precise

control of variables such as lighting and “Visual Noise” that are difficult to isolate in real-world testing. It was noted that while VR provides high edge sharpness through anisotropic filtering, real-world atmospheric conditions (glare, rain, or heat haze) might slightly degrade the Contrast Ratio (C) compared to the digital model. Despite these variations, the VR simulation effectively mirrored the Cognitive Load of real-world driving, making the Mean Reaction Time data a reliable predictor for physical road safety.

3.3.3 Chromatic Engineering and Color Design

The choice of color is not merely aesthetic but a functional engineering decision. Adhering to ISO 3864-1 and TIS 635, the yellow background provides the highest luminance contrast against common asphalt and urban backgrounds.

Besides, the yellow chromaticity triggers an immediate caution response in the human perceptual system, reducing the time required for behavioral intent recognition compared to blue or neutral tones.

3.3.4 Results and Technical Limitations

Prototype 3 (High-Contrast Triangle) outperformed all other models, achieving a Legibility score of 4.9 and the lowest mean reaction time (1.32s). This confirms that triangular geometry combined with high-contrast chromaticity provides the most efficient engineering communication. However, the resolution of VR headsets

(Pixel Density) can limit the visual data integrity of very small text or intricate symbols at extreme distances (>50m).

Current VR simulations focus heavily on visual perception but may not fully account for the vibrational or auditory stressors present in a physical vehicle, which can further impact a driver's cognitive processing speed.

The cognitive testing mathematically demonstrated why the baseline stickers failed to achieve rapid semantic decoding. Empirical evaluation showed that the mean reaction time for the baseline sign reached 2.45 seconds, which significantly violates the safe breaking threshold of 2.0 seconds. Signs exceeding this 2.0-second critical latency marker are classified as engineering failures, as they fail to provide following motorists with the required safety margins to prevent rear-end impacts.

3.4 Engineering Specifications for the Proposed Active LED Signaling System

Based on the empirical feedback and the performance limitations of passive materials, this study establishes the technical engineering specifications for the recommended Active Visual Signaling System (Situational LED Activation):

Luminous Intensity, the active LED array must emit a minimum luminous intensity of ≥ 400 cd under clear daylight conditions to overcome environmental luminance noise. Flash Rate / Pulse Modulation, the situational hazard warning must operate at an optimal flash

rate frequency of 1 to 2 Hz, matching human visual attention cycles. Ergonomic Vehicle Placement, the active photonic unit must be mounted securely at the vehicle's upper rear chassis center-line, optimizing the line-of-sight for trailing motorists. The system interfaces directly with the vehicle's telemetry, activating exclusively during rapid deceleration or lane-change indicators to preserve the deaf driver's total anonymity when stationary.

4. Conclusion

This research establishes an empirical baseline for standardizing traffic safety signage for deaf drivers in Thailand. Utilizing a Virtual Reality (VR) driving simulation, the quantitative results demonstrate that the current non-standardized signage system fails as an effective safety signal. The experimental data confirms that Prototype 3, designed with a high-contrast yellow-and-black triangular geometry, achieves the highest communication efficiency. This optimized engineering configuration successfully reduces the Mean Reaction Time (T_r) of general motorists to 1.32 seconds, which is well below the critical human factors safety threshold of 2.0 seconds. Consequently, the primary empirical contribution of this study is a validated design framework rooted in ISO 7010 and Universal Design principles that quantitatively minimizes cognitive latency during high-stakes traffic maneuvers.

In discussing these outcomes, the low semantic transparency of existing Department of Land Transport (DLT) stickers is systematically attributed to a violation of established driver cognitive schemas. The traditional crossed-ear icon, paired with a blue or orange palette, contradicts universal psychological expectations of motorists who associate road hazards exclusively with triangular layouts and yellow-black chromatic contrast specified by international safety standards. This deviation introduces severe semantic noise, forcing general motorists to rely on visual guesswork or perceive the sign as a non-critical decorative element.

Furthermore, qualitative data from semi-structured interviews provide crucial psychological context supplementing the empirical simulator data. Deaf participants expressed a profound reluctance to display permanent vehicle identifiers, raising collective concerns that non-situational signage acts as a mark of vulnerability that invites criminal targeting, harassment, or social exploitation when stationary. To resolve both empirical communication delays and qualitative security concerns, this research proposes a conceptual roadmap transitioning from passive stickers to an active photonic signaling system (Situational LED Visual Communication). By activating only during dynamic traffic maneuvers, this system satisfies engineering safety requirements while preserving driver anonymity and psychological security when stationary.

5. Acknowledgement

The author sincerely thanks the Faculty of Mass Communication Technology (RMUTP) and the Faculty of Communication Arts (DPU) for their support, collaboration, and valuable insights. Deep appreciation is also extended to the National Association of the Deaf in Thailand (NADT), as well as the colleagues and experts whose constructive feedback and dedicated assistance were instrumental to the success of this research.

6. References

- [1] Department of Land Transport, “Land Transport Act,” [Online]. <https://datagov.mot.go.th/dataset>. [Accessed: Apr. 10, 2026]
- [2] *Annual report 2011*, Statistical Data: Traffic Volume and Traffic Accident Data Group,” Department of Highways, 2011.
- [3] J. R. Luis, A. C. Alcocer, M. Gertrudix, M. D. C. Gertrudis Casado, P. Giardullo, and D. Wuebben, “Recommendations to improve communication effectiveness in social marketing campaigns: Boosting behavior change to foster a circular economy,” *Cogent Social Sciences*, vol. 8, no. 1, 2022.
- [4] G. Adir, N. E. Pascu, V. Adir, and G. Geambasu, “The graphic language of signs, symbols, pictograms in a global world,” *Journal of Industrial Design and Engineering Graphics*, vol. 19, 2024.
- [5] K. Mingsiritham and G. Chanyawudhiwan, “A Study of Using Smart Book to Enhance Communication Ability for Hearing-Impaired Students,” *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, vol. 13, no.12, 2018.
- [6] S. Dithapan, “Symbol and Image Design for Public Communication based on Universal Design Principles,” [Online]. <https://www.chulapress.com/view.php?id=1285>. [Accessed: Apr. 10, 2026]
- [7] Department of the Empowerment of Persons with Disabilities, “Persons with Disabilities Quality of Life Promotion Act, B.E. 2550 (2007),” [Online]. <https://songkhla.dop.go.th/th/news/56/215> [Accessed: Apr. 25, 2026].
- [8] R. Barthes, *Mythologies*, A. Lavers, Trans. New York, NY: Hill and Wang, 1972.
- [9] S. Tongsiri, “Scaling-up community-based rehabilitation programs in rural Thailand: the development of a capacity building program,” *BMC Health Services Research*, vol. 22, 2022.
- [10] S. Hall, “Cultural Studies: Two Paradigms,” *Media, Culture & Society*, vol. 2, pp. 57–72, 1980.
- [11] V. Vorakitphan and N. Pattananukit, “Design symbols to raise awareness of visually impaired persons using haptic floor for safety on roadways,” *International Journal of Asia Digital Art and Design Association*, vol. 29,

- no.3, pp. 90-98, 2025.
https://doi.org/10.20668/adada.29.3_
- [12] L. Shizhu, H. Qiuyu, M. Ziyi, and J. Peanjiang, "A study on the design of a universal signage system for the Ruijin Soviet cultural heritage site," *Heritage Science*, vol. 12, no.1, 2024.
- [13] Graphical symbols - Safety colours and safety signs - Registered safety signs, ISO 7010:2019, 2019.
- [14] G. Kress and T. Van Leeuwen, *Reading images: The grammar of visual design*, 3rd ed. Routledge, 2021.
- [15] R. L. Mace, *Universal design: Barrier free environments for everyone*, Designers West, 1985.
- [16] P. Pimkrajang, "The Study on the Way of Using Online Media of the People with Hearing Loss," M.S. thesis, Dept. Comm. Arts, Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2017.
- [17] C. E. Shannon and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, 1949.
- [18] C. Ware, *Visual thinking for design*, 2nd ed. Morgan Kaufmann, 2020.
- [19] Y. Xu, T. Zhang, B. W. Genter, B. Cai, S. Qi, S. Ma, F. Sun, C. Liao, N. A. Poyakov, G. Vogel, J. L. Lee, and L. Peng, "Redescription and systematics of *Oligodon ornatus* Van Denburgh, 1909, and two enigmatic related species (Squamata, Colubridae)," *Zoosystematics and Evolution*, vol. 102, no. 1, pp. 315–346, 2026.
- [20] *Accessible design*, 2010 ADA Standards, 2010.
- [21] *Safety colours and safety signs*, International Organization for Standardization. (ISO Standard No. 3864-1:2011), 2011.
- [22] *Graphical symbols-registered Public information symbols*, International Organization for Standardization. (ISO Standard No. 7001:2023), 2023.
- [23] Department of Empowerment of Persons with Disabilities. Manual of standard facilities for persons with disabilities and universal design, Ministry of Social Development and Human Security. 2012.
- [24] *Safety colours and safety signs*, Thai Industrial Standards Institute. (TIS 635–2554), 2011.

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับอบแห้งอะโวคาโด

ยุทธนา ศรีอุดม^{1*} อนุรัตน์ เทวตา¹ สังคม สัพโส¹ และ ชินเนีย รัตทิภัทร์²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

²คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

^{1, 2}41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 9 เมษายน 2569 แก้ไขบทความ 26 มิถุนายน 2569 ตอรับบทความ 29 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง โดยระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานแบบผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงกลางวัน และพลังงานไฟฟ้าในช่วงที่แสงไม่เพียงพอ เพื่อให้กระบวนการอบแห้งดำเนินได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง การทดลองใช้อะโวคาโดปริมาณเริ่มต้น 5 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 84.7% (wb) โดยควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งที่ 60, 65 และ 70 °C ผลจากการศึกษา พบว่า ระบบอบแห้งสามารถรักษาอุณหภูมิได้อย่างเสถียร และมีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดลดลงจนเหลือประมาณ 10% (wb) โดยใช้เวลาอบแห้ง 24.1, 22.8 และ 21.9 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ โดยมีค่าเท่ากับ 4.55%, 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 70 °C ให้ประสิทธิภาพสูงสุด สรุปได้ว่าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดระยะเวลาในการอบ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอะโวคาโดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว

คำสำคัญ : อบแห้ง; พลังงานแสงอาทิตย์; อะโวคาโด; พลังงานสะอาด; การผลิตอย่างยั่งยืน

A Solar Dryer Integrated with an Electric Heating System for Avocado Drying

Yutthana Sriudom^{1*} Anurat Tewata¹ and Sangkom Sappaso¹ and
Zinnia Ratipat²

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

²Faculty of Business Administration and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

^{1, 2}41/1 moo 7 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 9 April 2026; Revised 26 June 2026; Accepted 29 June 2026

Abstract

This research aims to design, develop, and evaluate the performance of a hybrid solar–electric dryer for drying local avocado varieties. The developed drying system operates by combining solar energy during the daytime with electrical energy when solar radiation is insufficient, enabling continuous drying for 24 hours. The experiment was conducted using 5 kg of avocados with an initial moisture content of approximately 84.7% (wet basis), under controlled drying temperatures of 60, 65, and 70 °C. The results showed that the drying system was able to maintain stable temperatures and achieve uniform heat distribution, resulting in a reduction of moisture content to approximately 10% (wet basis), with drying times of 24.1, 22.8, and 21.9 hours, respectively. Furthermore, the thermal efficiency of the system increased with higher drying temperatures, with values of 4.55%, 5.31% และ 5.65%, respectively, indicating that the temperature of 70 °C provided the highest efficiency. In conclusion, the developed hybrid solar–electric dryer effectively enhances drying performance, reduces drying time, and extends the shelf life of avocados and helps reduce post-harvest losses.

Keywords : Drying; Solar Energy; Avocado; Clean Energy; Sustainable Production

** Corresponding Author. Tel.: +666 6976 5424, E-mail Address: numkmutt@rmutl.ac.th*

1. บทนำ

อะโวคาโดเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูง และมีการขยายพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะในอำเภอพบพระ จังหวัดตาก ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้สามารถผลิตอะโวคาโดได้ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม การผลิตที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวกลับก่อให้เกิดปัญหาสำคัญ คือ การกระจุกตัวของผลผลิตในช่วงฤดูกาลเดียวกัน ส่งผลให้เกิดภาวะผลผลิตล้นตลาด ราคาผลผลิตตกต่ำ และไม่สามารถระบายสินค้าได้ทันเวลา นอกจากนี้ อะโวคาโดยังเป็นผลไม้ที่มีอัตราการสุกและเสื่อมคุณภาพรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest loss) ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบเกษตรและอาหาร โดยมีรายงานว่า การสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิตทางการเกษตรทั่วโลกอาจสูงถึง 30-40% [1] ดังนั้น การพัฒนาแนวทางเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มมูลค่าผลผลิตจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

การแปรรูปผลผลิตด้วยกระบวนการอบแห้งเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากการลดความชื้นและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งช่วยลดการเน่าเสียและเพิ่มโอกาสในการกระจายสินค้าไปยังตลาดนอกฤดูกาลได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิม (Open sun drying) ยังมีข้อจำกัด เช่น การปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และการควบคุมคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ [2] จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ในช่วงที่ผ่านมา เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน โดยมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบ เช่น การอบแห้งแบบพาสซีฟ การอบแห้งแอคทีฟ และการ

อบแห้งแบบไฮบริด อย่างไรก็ตาม ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดสำคัญ คือ ไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลากลางคืนหรือในสภาพอากาศที่มีเมฆมาก อีกทั้งยังควบคุมอุณหภูมิได้ยาก ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [3] ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาระบบอบแห้งแบบผสมผสานพลังงาน (Hybrid Solar Dryer) ซึ่งใช้แหล่งพลังงานเสริม เช่น พลังงานไฟฟ้า ชีวมวล หรือระบบกักเก็บความร้อน เพื่อให้สามารถดำเนินการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากขึ้น

จากการสืบค้นข้อมูลและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยมีนักวิจัยหลายท่าน ที่ได้ศึกษาและวิจัยด้านการอบแห้งตัวอย่างเช่น Sandali et.al. [4] ได้สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งรับพลังงานความร้อนจากใต้พิภพมาเป็น พลังงานความร้อนเสริมในการอบแห้ง แต่ในการทดลองจะใช้เครื่องทำน้ำร้อนสร้างความร้อนแทนความร้อนจากใต้ดินพบว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้เครื่องอบแห้งได้ โดยสามารถทำอุณหภูมิอากาศ ได้ 46 - 58 °C ในช่วงกลางวัน ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมี ค่าประมาณ 25 °C และสามารถทำอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตอนกลางวันได้ 46 °C ขณะที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 15 °C ดังนั้น เครื่องอบแห้งนี้จึงสามารถทำการอบแห้งได้ต่อเนื่องในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด Islam et.al. [5] ได้ศึกษาผลกระทบของการถ่ายเทความชื้นของผลไม้เมื่อใช้ส่วนวางผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 3 แบบ แบบที่ 1 คือแบบใช้ท่ออากาศขนาดเล็กเป็นช่องทางเข้าของอากาศและใช้กระจกแผ่นเรียบปิดคลุมซึ่งมีรูเป็นช่องทางออกของอากาศ แบบที่ 2 คือ ใช้กระจกสองชั้นประกอบเป็นรูปหลังคาสามเหลี่ยมที่มีช่องว่างให้อากาศออกและมีรูตรงหน้าจั่วให้อากาศเข้า แบบที่ 3

คือแบบใช้กระจกแผ่นเรียบปิดด้านบน ด้านข้างมีรูอากาศ 2 รู ทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นช่องอากาศเข้าออก จากการทดลองปรากฏว่า ส่วนวางผลิตภัณฑ์แบบที่ 3 มีการถ่ายเทความชื้นได้ดีที่สุด เนื่องจากมีอัตราการระเหยน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 58.9% P. Kotchapoom [6] ได้ทำการประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาทำงานร่วมกับพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง เมื่อค่า Water activity ต่ำกว่า 85% ของน้ำหนักของปลา โดยใช้อุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก Arduino load cell ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแจ้งเตือนเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต การทดสอบจะใช้ปลาตากเป็นวัตถุดิบและใช้อุณหภูมิระหว่าง 50-60 °C โดยแบ่งการทดสอบวิธีการผลิต 3 รูปแบบ จากการทดสอบ พบว่า การตากแบบธรรมชาติ ใช้ระยะเวลาในการผลิต 5 h/ครั้ง ซึ่งการตากโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาในการผลิต 3.5 h/ครั้ง และการตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโซลาร์เซลล์ใช้ระยะเวลาในการผลิต 3 h/ครั้ง การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับโซลาร์เซลล์ใช้ระยะเวลาในการผลิตน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีจุดคุ้มทุนมากที่สุด และ Y. Sriudom, A. Tewata, J. Visedmanee [7] ได้ทำการสร้างสร้างโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจำลองในการตากกล้วย และศึกษาผลของความเร็วลม ตำแหน่งช่องทางลมเข้า และช่องทางลมออกที่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้น และอัตราการอบแห้งของกล้วยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยความชื้นเริ่มต้นของกล้วยตากประมาณ 230 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง อบจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง โดยโรงเรือนที่สร้างขึ้นมีขนาดกว้าง 1.25 เมตร ยาว 1.90 เมตร และ สูง 0.80 เมตร ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตโปร่งแสงเป็นวัสดุหลัก และใช้พัดลมดูดอากาศ ขนาด 6 นิ้ว สำหรับการถ่ายเทอากาศ

โดยแบ่งระดับความเร็วลมออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 1.0 เมตรต่อวินาที (ระดับ 1) และ 1.5 เมตรต่อวินาที (ระดับ 2) จากการทดสอบ พบว่า กรณีช่องทางลมเข้าด้านล่าง ช่องทางลมออกอยู่บน โดยมีความเร็วลมทางเข้าเฉลี่ย 1.5 เมตรต่อวินาที ทำให้อัตราการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมีอัตราการลดลงของน้ำหนักเฉลี่ยต่อชั่วโมง เท่ากับ 0.157 กิโลกรัมต่อชั่วโมง Al-Juhaimi, F. [8] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางเคมี ปริมาณน้ำมัน และคุณสมบัติทางชีวภาพของส่วนต่างๆ ของผลอะโวคาโดพันธุ์ "Fuerte" (FAF) ทั้งระยะดิบ (สีเขียว) และระยะสุก โดยผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยอากาศ ไมโครเวฟ และตู้อบ ผลการศึกษาพบว่า เนื้อของผลดิบที่อบแห้งด้วยอากาศมีปริมาณน้ำมันสูงกว่า (76.84%) เมื่อเทียบกับเนื้อของผลสุกที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟซึ่งมีปริมาณน้ำมันอยู่ที่ 70.87% นอกจากนี้ยังมีการประเมินปริมาณน้ำมันในส่วนเปลือกและเมล็ดของ FAF อีกด้วย กรดโอเลอิก ปาล์มติก และไลโนเลอิก เป็นกรดไขมันหลักที่พบในเนื้อ และเปลือกของ FAF โดยปริมาณกรดโอเลอิกในเนื้อผลดิบและผลสุกอยู่ที่ 71.07% และ 72.85% ตามลำดับ สำหรับสาร catechin ในเนื้อผลดิบและผลสุกนั้น พบในปริมาณสูงที่ 190.51 และ 195.45 มก./100 กรัม ในตัวอย่างสด ตามลำดับ ผลการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบฟีนอลิก อื่นๆ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระยังพบว่า มีความแตกต่างกันไปตามระยะความสุก วิธีการอบแห้ง โดยตรวจพบสาร Dihydroxybenzene ในปริมาณสูงสุดในเปลือกผลสุกที่อบแห้งด้วยอากาศ และเมล็ดผลดิบสด เท่ากับ 234.74 มก./100 กรัม และ 227.18 มก./100 กรัม ตามลำดับ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ระบบอบแห้งแบบผสมผสานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้สูงถึง ประมาณ 70% และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าระบบทั่วไป [9]

นอกจากนี้ ยังมีศักยภาพในการลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาระบบอบแห้งประเภทนี้อย่างกว้างขวาง แต่ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นไปที่การทดสอบในพืชชนิดอื่น เช่น ผลไม้ทั่วไป ผัก หรือปลา และเน้นการปรับปรุงองค์ประกอบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง เช่น ระบบถ่ายเทความร้อน การไหลของอากาศ และวัสดุสะสมความร้อน

ดังนั้น จะเห็นได้ว่ายังมีข้อจำกัดและช่องว่างขององค์ความรู้ในหลายประเด็น ได้แก่ (1) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอบแห้งแบบผสมผสานกับอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งมีลักษณะเฉพาะด้านโครงสร้างเนื้อและปริมาณไขมันสูง (2) การออกแบบระบบอบแห้งที่เหมาะสมกับบริบทของเกษตรกรระดับชุมชน (3) การประเมินประสิทธิภาพของระบบอย่างเป็นรูปธรรม

จากช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบอบแห้งในด้านอุณหภูมิ การลดความชื้น และระยะเวลาในการอบแห้ง รวมไปถึงศึกษาศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และเพิ่มมูลค่าของอะโวคาโดในระดับชุมชน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่ใช้สำหรับการอบแห้ง

2.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ปัจจุบันมีการยอมรับการใช้งาน 3 ลักษณะ คือ

1) การอบแห้งระบบพาสซีฟ (Passive) คือ ระบบการอบแห้งที่ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับ

กระแสลมธรรมชาติ โดยไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าหรืออุปกรณ์กลไก ในการหมุนเวียนอากาศ

2) การอบแห้งระบบแอคทีฟ (Active) คือ ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอุปกรณ์ช่วยหมุนเวียนอากาศ เช่น พัดลม เพื่อบังคับทิศทางลมให้ผ่านแผงรับแสงอาทิตย์และผลิตภัณฑ์

3) การอบแห้งระบบไฮบริด (Hybrid) คือระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ช่วยในเวลาที่แสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ เช่น ใช้ร่วมกับพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวล พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ

2.1.2 หลักการวัดความชื้นในวัสดุ [11] โดยการคำนวณความชื้นแบบมาตรฐานเปียก คำนวณได้จากสมการที่ (1)

1) ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก

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

โดยที่

M_w = ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

w = มวลเปียกของวัสดุ (kg)

d = มวลแห้งของวัสดุ (kg)

2) อัตราการอบแห้ง คำนวณได้จาก สมการที่ (2)

$$\text{Drying rate} \quad \frac{dX}{dt} = \frac{X_0 - X}{t - t_0} \quad (2)$$

โดยที่

$X_0 - X$ = ค่าความเปลี่ยนแปลงของความชื้น (kg)

$t - t_0$ = ค่าความเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา (h)

3) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง (Thermal efficiency) [12] คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\eta_{th} = \frac{(m_i - m_f) * h_{fg}}{(A_c * I * t) + E_{heater}} * 100 \quad (3)$$

โดยที่

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)

m_i = มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง (kg)

m_f = มวลวัสดุหลังการอบแห้ง (kg)

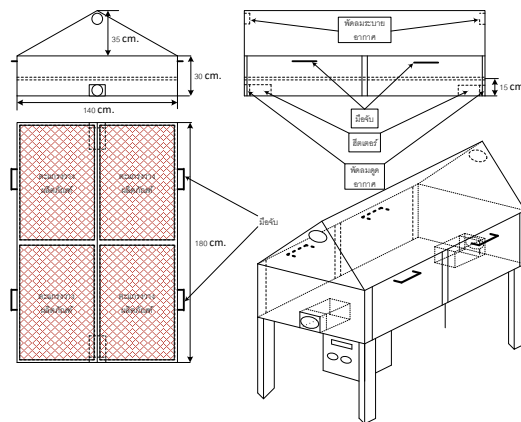
h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอของน้ำ (KW-h/kg)

A_c = พื้นที่โรงเรือนที่รับรังสีอาทิตย์ (m²)

I = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโรงเรือน (W/m²)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

E_{heater} = พลังงานที่ใช้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (kW-h)



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยมีเงื่อนไขเบื้องต้นในการออกแบบ ดังนี้

1) อะโวคาโดพันธุ์พื้นเมืองที่ใช้ในการอบแห้งครั้งละ 5 kg ความชื้นเริ่มต้นของอะโวคาโดประมาณ 84.7 (% w.b.) และ ความชื้นสุดท้ายของ อะโวคาโดประมาณ 10 (% w.b.)

2) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน

3) รูปแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดสอบลักษณะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเครื่องอบแห้งวางทำมุมรับแสงที่ 18° หันหน้าไปทางทิศใต้

2.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

1) อะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง

2) เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ SPM-1116SD ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2,000.0 W/m² ความแม่นยำ ± 10 W/m²

3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL 2200 ขนาด 8 ช่องสัญญาณ และ ตัวขยายสัญญาณ Analog Expansion Module EX2 4 ขนาด 16 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 °C ถึง 1,300 °C มีความแม่นยำ ± 0.1 °C

4) เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น SF-400A ขนาด 0 – 7,000 g ความละเอียด 0.1 กรัม ความแม่นยำ ± 0.2%

2.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ลานนา ตาก ระหว่างวันที่ 7 – 9 มีนาคม 2568 โดยมี ขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ และ อุปกรณ์ในการตรวจวัดเข้ากับชุดทดสอบทั้ง 3 ชุด ดัง แสดงในรูปที่ 2 โดยทำการบันทึกอุณหภูมิอุณหภูมิ ความเข้มแสง ทุก ๆ 10 วินาที ด้วยเครื่องวัดความเข้ม แสงอาทิตย์ และ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เพื่อนำมาใช้ คำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และ ชั่งน้ำหนัก ผลิตรัณฑ์ทุก ๆ 1 ชม. โดยนำอะโวคาโดในตู้อบแห้ง ออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแล้วนำกลับเข้า ตู้อบแห้ง โดยจะควบคุมเวลาในการชั่งน้ำหนักไม่เกิน 1 นาทีต่อครั้ง เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้น มาตรฐานเปียก และอัตราการอบแห้ง เริ่มบันทึกข้อมูล ตั้งแต่เวลา 8.00 น. เป็นต้นไป จนกระทั่งผลิตรัณฑ์แห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้าย และนำข้อมูลที่ได้มาใช้สำหรับ วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

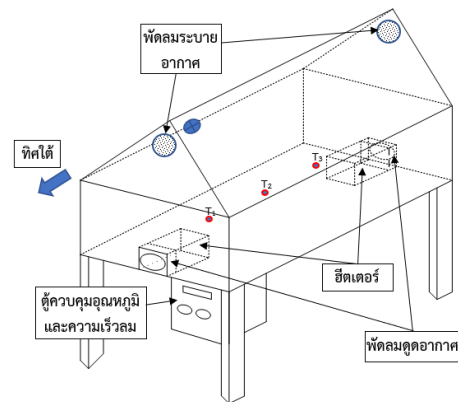
2) การเตรียมอะโวคาโด สำหรับอบแห้ง โดยนำ ผลอะโวคาโดที่มีอายุ ตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป แต่ไม่เกิน 8 เดือน จำนวน 5 กิโลกรัม มาหั่นบางตามแนวยางของผล โดยหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วนำผลอะโวคาโดที่หั่น แล้วไปจัดวางให้เต็มถาด โดยไม่ให้อะโวคาโดซ้อนทับกัน ซึ่งการทดสอบอบแห้งจะทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ

3) ระบบระบายความชื้นของห้องอบแห้งได้รับการออกแบบโดยติดตั้งพัดลมระบายอากาศ ขนาด 21 วัตต์ ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ โดย ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 3.9 เมตร/วินาที ทำหน้าที่ระบาย อากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้งอย่างต่อเนื่องตลอด ระยะเวลาการทำงาน เพื่อควบคุมปริมาณความชื้น สัมพัทธ์ภายในห้องอบโดยการถ่ายเทมวลของไอน้ำจาก ผลิตรัณฑ์สู่บรรยากาศภายนอก สำหรับการควบคุม อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ใช้ฮีตเตอร์ ขนาด 2,000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน

เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบ โดยการทำงานของฮีตเตอร์ จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ซึ่งจะสั่งการให้ฮีตเตอร์ ทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ และหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้

4) คำนวณหาปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และอัตราการอบแห้ง ตามสมการที่ (1) – (2)

5) คำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ระบบอบแห้ง (Thermal efficiency) ตามสมการที่ (3)



● ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ

● ตำแหน่งในการวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

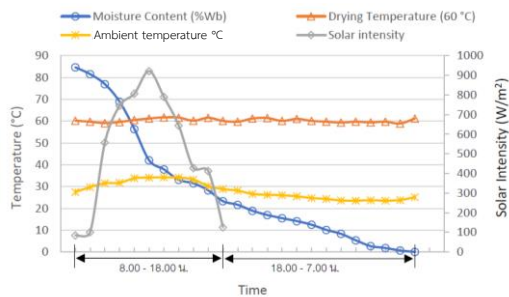
รูปที่ 2 ตำแหน่งอุปกรณ์ และจุดตรวจวัดอุณหภูมิภายใน ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุม อุณหภูมิที่ 60 °C แสดงดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโด ลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดย มีความชื้นเริ่มต้น 84.7 (% w.b.) และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะ ในช่วงเวลา 11.00–13.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้ม รังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง 745–921 W/m² โดย

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 โดยอุณหภูมิภายในตู้อบ มีค่า $59.3 - 61.7^\circ\text{C}$ และ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 60.3°C ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ แต่ระบบยังสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งไว้ใกล้เคียง 60°C ได้ จากการใช้อีทีเตอร์เป็นตัวช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 24.1 ชั่วโมง

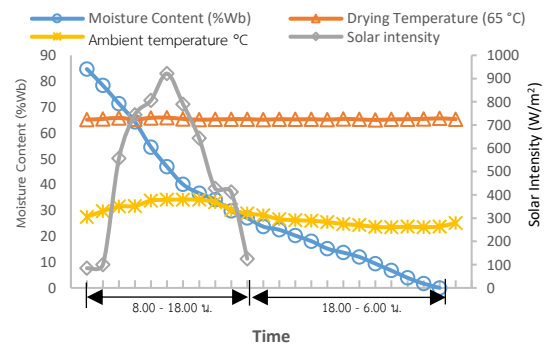


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด 60°C อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลากการอบแห้ง

3.2 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 65°C แสดงดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโด ลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเริ่มต้นมีความชื้นเริ่มต้น $84.7 (\% \text{ w.b.})$ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเนื้อวัสดุสูง โดยเฉพาะในช่วงเวลา $11.00-13.00$ น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง $745-921 \text{ W/m}^2$ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 หลังจากนั้น อัตราการลดลงของความชื้นเริ่มชะลอตัวลง

โดยอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ระหว่าง $65.1 - 65.9^\circ\text{C}$ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 65.2°C ถึงแม้ว่าจะไม่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ แต่ระบบยังสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งไว้ใกล้เคียง 65°C ได้ จากการใช้อีทีเตอร์เป็นตัวช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ส่งผลให้ความชื้นของอะโวคาโดยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 22.8 ชั่วโมง

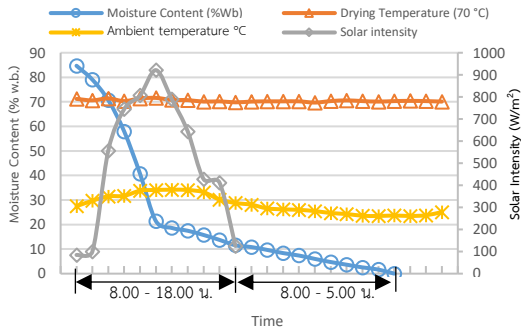


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด 65°C อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลากการอบแห้ง

3.3 ผลการทดสอบอบแห้งอะโวคาโดด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 70°C แสดงดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโดลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเริ่มต้นมีความชื้นเริ่มต้น $84.7 (\% \text{ w.b.})$ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากมีปริมาณน้ำอิสระภายในเนื้อวัสดุสูง โดยเฉพาะในช่วงเวลา $11.00-13.00$ น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูง อยู่ในช่วง $745 - 921 \text{ W/m}^2$ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 921.3 W/m^2 หลังจากนั้น อัตราการลดลงของความชื้นเริ่มชะลอตัวลง โดยใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์รวมทั้งสิ้น 21.9 ชั่วโมง

นอกจากนี้อุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของวัน โดยอยู่ในช่วง 23.5 – 34.7 °C แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการอบแห้งภายในระบบ



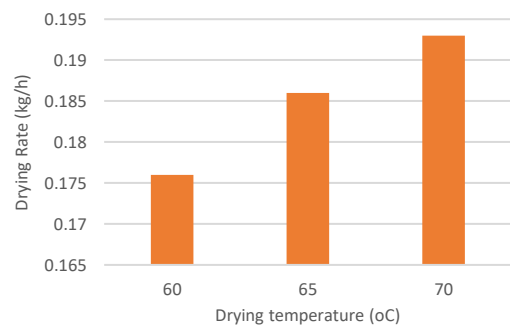
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด (Moisture Content, % w.b.) อุณหภูมิการอบแห้งที่กำหนด 70 °C อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (Solar intensity) ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง

จากรูปที่ 3-5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของอะโวคาโด อุณหภูมิการอบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ภายใต้ อุณหภูมิการอบแห้ง 60°C, 65°C และ 70°C พบว่า ปริมาณความชื้นของอะโวคาโดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการอบแห้ง โดยในช่วงแรก ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของน้ำอิสระที่อยู่บริเวณผิวและช่องว่างภายในเนื้ออะโวคาโด จากนั้นอัตราการลดความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปริมาณน้ำภายในผลิตภัณฑ์เหลือน้อยลง ซึ่งเป็นลักษณะของช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) ที่การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ของความชื้นจากภายในเนื้ออะโวคาโดออกสู่ผิวหน้า นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจาก 60°C เป็น 65°C และ 70°C พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงจาก 24.10 ชั่วโมง เป็น 22.80 ชั่วโมง และ 21.90 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้

เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของความชื้น ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถึงแม้ความเข้มข้นสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาการทดลอง แต่ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสามารถรักษาอุณหภูมิการอบแห้งให้อยู่ในระดับที่กำหนดได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การลดลงของความชื้นเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด

3.4 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการอบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 6

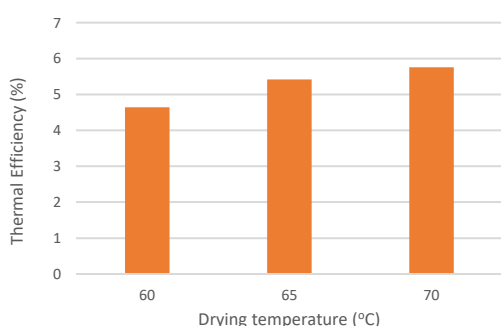
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 70°C อัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อุณหภูมิ 60°C 65°C และ 70°C มีอัตราการอบแห้ง 0.176 kg/h 0.186 kg/h และ 0.193 kg/h ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ความชื้นภายในอะโวคาโดถูกกำจัดได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิ 70°C จึงเป็นสถานะที่ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุดในการทดลองนี้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature)

3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) แสดงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 70°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อุณหภูมิ 60°C มี ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 4.55% ขณะที่อุณหภูมิ 65°C และ 70°C มีค่าประมาณ 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้ พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบถูกนำไปใช้ในการ ระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 70°C เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนสูงสุดในช่วงการศึกษานี้ เนื่องจากสามารถ ถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า ทำให้อัตราการ ระเหยความชื้นสูงขึ้น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) และ อุณหภูมิการอบแห้ง (Drying Temperature)

3.5 อภิปรายผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ได้แก่ [15] [16] [17] และ [9] ร่วมกับงานวิจัยของผู้วิจัย พบว่า งาน ของ [15] แสดงให้เห็นว่าระบบอบแห้งแบบผสมผสาน สามารถลดระยะเวลาในการอบ และเพิ่มความ

เสถียรภาพของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่สามารถลดความชื้นของอะโว คาโดจาก 84.7% เหลือประมาณ 10% ภายในเวลา 21.9–24.1 ชั่วโมง พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิได้อย่าง คงที่ตลอด 24 ชั่วโมง ขณะที่ [16] ได้อธิบายเชิงทฤษฎี ว่าระบบ Hybrid มีข้อได้เปรียบด้านการทำงานต่อเนื่อง และการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน ซึ่งสนับสนุนผลการ ทดลองของงานนี้โดยตรง ในส่วนของ [17] ซึ่งใช้แหล่ง ความร้อนเสริมจากระบบแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า สามารถรักษาอุณหภูมิในช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ได้ เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้ฮีตเตอร์ ไฟฟ้าซึ่งให้ความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ แม่นยำและเสถียรมากกว่า ขณะที่ [9] ซึ่งเป็นการศึกษา ทดลองจริงในผลิตภัณฑ์ปลา พบว่าระบบ Hybrid สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลของ งานวิจัยนี้เช่นกัน โดยสรุป งานวิจัยของผู้วิจัยมีความ สอดคล้องกับทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองของงานวิจัย ก่อนหน้าในด้านการใช้พลังงานผสมเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพและความต่อเนื่องของกระบวนการอบแห้ง ขณะเดียวกันยังแสดงจุดเด่นในด้านการควบคุมอุณหภูมิ ที่แม่นยำ อีกทั้งการประยุกต์ใช้กับอะโวคาโดพันธุ์ พันธ์เมืองยังมีการศึกษาในวรรณกรรมค่อนข้างจำกัด

4. สรุป

ผลการศึกษาการพัฒนาเครื่องอบแห้งอะโวคาโด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมและรักษาอุณหภูมิการ อบแห้งในช่วง 60 – 70 °C ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยม ีการกระจายความร้อนภายในตู้อบอย่างสม่ำเสมอ ส่งผล ให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนและการระเหยความชื้น มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิที่ กำหนดไว้ที่ 60°C 65°C และ 70°C ได้แม้ในช่วงที่ไม่มี แสงอาทิตย์ ในด้านการอบแห้งอะโวคาโดที่มีความชื้น

เริ่มต้นเฉลี่ย 84.7% (w.b.) จนเหลือความชื้นสุดท้าย 10 (% w.b.) พบว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C 65°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ 24.1 22.8 และ 21.9 ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยความชื้นและลดระยะเวลาในการอบแห้ง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง โดยมีค่าเท่ากับ 4.55% 5.31% และ 5.65% ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ให้ประสิทธิภาพสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการทดลอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำหรับทุนสนับสนุนงานพื้นฐาน (Fundamental Fund, FF) และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่เอื้อเฟื้อพื้นที่ในการทำวิจัย และสนับสนุนอุปกรณ์ รวมไปถึงเครื่องมือสำหรับทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. G. Unar, S. A. Khatri, N. H. Mirjat, P. H. Shaikh, S. A. R. A. Zaidi, and M. F. Arain, "Solar drying technologies: A review of design, efficiency, and environmental impacts," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 226, pp. 126–140, 2025.
- [2] A. Afzal, T. Iqbal, K. Ikram, M. N. Anjum, M. Umair, M. Azam, S. Akram, F. Hussain, M. A. ul Zaman, A. Ali, and F. Majeed, "Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying," *Heliyon*, vol. 9, 2023.
- [3] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, "A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products," *Energy*, vol. 293, 2024.
- [4] M. Sandali, A. Boubekri, D. Mennouche, and N. Gherraf, "Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study," *Renewable Energy*, vol. 135, vol.1, pp. 186–196, 2019.
- [5] M. Islam, M. I. Islam, M. Tusar, and A. H. Limon, "Effect of cover design on moisture removal rate of a cabinet type solar dryer for food drying application," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 769–776, 2019.
- [6] P. Kotchapoom, "Hybrid Solar Power Dryer with Alarm System," *EAU HERITAGE JOURNAL Science and Technology*, vol 16, no.1, pp. 175 – 188, 2022.
- [7] Y. Sriudom, A. Tewata, J. Visedmanee, "Greenhouse Effect Solar Dryer for Banana," *Rattanakosin Journal of Science and Technology*, vol 7, no. 3, pp. 222–235, 2025.
- [8] F. Al. Juhaimi, N. Uslu, M. M. Ozcan, E. E. Babiker, K. Ghafoor, I. M. Ahmed, and O. N. Alsawmahi, "Effects of drying process on oil quality, the bioactive properties and phytochemical characteristics of avocado (Fuerte) fruits harvested at two different

- maturity stages,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 45, 2021.
- [9] F. L. Rashid, K. A. Hammoodi, N. M. L. Al Maimuri, M. K. Abdalrahem, A. M. Ashour, A. Bouabidi, S. A. Kadhim, Y. Aryanfar, and A. Chibani, “Recent advancements in hybrid solar dryer: A comprehensive review of integration strategies, performance enhancements, and applications,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 171, 2026.
- [10] C. K. Saha, N. K. Roy, J. Khatun, N. Tasnim, and M. S. Alam, “Solar hybrid dryers for fruits, vegetables, and fish: A comprehensive review on constructional features and techno-economic-environmental analysis,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 68, 2024.
- [11] Y. Sriudom, A. Tewata, and S. Sappaso , “An Experimental Study of Solar Chili Dryer with Volcanic Rock Thermal Storage,” *Rattanakosin Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 21 – 33, 2024.
- [12] A. Tewata, and Y. Sriudom, “An Experimental Study on Increasing Efficiency of Solar Cell Modules by Flat Heat Pipe Cooling,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 83 -94, 2018.
- [13] Y. Sriudom, A. Tewata, S. Sappaso and N. Pratumchai, “An Experimental Study of Solar Panel Efficiency with Water Cooling,” *RMUTP Research Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 1-13, 2021.
- [14] A. E. Elwakeel, M. A. Gameh, A. S. Eissa, and M. B. Mostafa, “Recent advances in solar drying technology for tomato fruits: A comprehensive review,” *International Journal of Applied Energy Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 37–44, 2024.
- [15] A. E. Elwakeel, D. E. M. Wapet, W. A. El. Mahmoud, S. E. Abdallah, M. M. Mahmoud, S. A. El. M. Adjourn, and A. A. Tantawy, “Design and implementation of a PV-integrated solar dryer based on internet of things and date fruit quality monitoring and control,” *International Journal of Energy Research*, vol. 47, pp 15023 – 15040, 2023.
- [16] A. Afzal, T. Iqbal, K. Ikram, M. N. Anjum, M. Umair, M. Azam, S. Akram, F. Hussain, M. A. ul Zaman, A. Ali, and F. Majeed, “Development of a hybrid mixed-mode solar dryer for product drying,” *Heliyon*, vol. 9, no. 3, 2023.
- [17] D. Kong, Y. Wang, M. Li, and J. Liang, “A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products,” *Energy*, vol. 293, 2024

Effect of Al₂O₃ Particle Reinforcement on Mechanical and Thermal Properties of UHMWPE Composites

Prakorb Chartpuk¹ and Jack Chumin^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, ² Department of Tool and Die Engineering

^{1,2} Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

^{1,2} 1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawan Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok, Thailand 10800

Received 25 May 2026; Revised 28 June 2026; Accepted 29 June 2026

Abstract

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is widely recognized for its excellent wear resistance, impact toughness, and chemical stability; however, its relatively low stiffness and thermal conductivity restrict its application in advanced engineering components. This study investigates the influence of micron-sized B-grade aluminum oxide (Al₂O₃) particles on the mechanical, thermal, chemical, and microstructural properties of UHMWPE composites. Composites containing 0–25 wt.% Al₂O₃ were fabricated through ultrasonic particle dispersion, high-speed powder homogenization, and hot compression molding. The materials were subsequently characterized using mechanical, thermal, spectroscopic, and microstructural analyses. The results demonstrated that Al₂O₃ reinforcement effectively enhanced the stiffness, hardness, breaking strength, and thermal conductivity of UHMWPE composites, while reducing elongation at break and impact resistance because the rigid ceramic particles restricted polymer-chain mobility. FTIR analysis confirmed that the molecular structure of UHMWPE remained unchanged after reinforcement, indicating that the improvement in properties originated primarily from physical interactions between the polymer matrix and ceramic particles. SEM observations further revealed effective particle dispersion and improved interfacial bonding at moderate filler contents, whereas localized particle agglomeration became more evident at higher loadings. The incorporation of ceramic particles significantly improved the thermal conductivity of the composites, demonstrating the effectiveness of ceramic reinforcement in enhancing heat-transfer capability. Overall, the findings confirm that controlled incorporation of Al₂O₃ particles provides a practical and efficient strategy for simultaneously enhancing the mechanical rigidity, thermal performance, and structural reliability of UHMWPE composites.

Keywords : UHMWPE Composites; Aluminum Oxide Reinforcement; Mechanical Properties; Thermal Conductivity; Polymer Composite Materials

* *Corresponding Author. Tel.: +668 7989 2996, E-mail Address: jack.c@rmutp.ac.th*

1. Introduction

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is a high-performance engineering polymer with excellent wear resistance, low friction, chemical stability, and high impact strength. However, its relatively low stiffness, limited thermal stability, and creep susceptibility restrict its structural applications. Consequently, ceramic particle reinforcement has been widely employed to enhance its mechanical and thermal performance.

Among various ceramic reinforcements, aluminum oxide (Al_2O_3) particles have attracted considerable attention because of their high hardness, high elastic modulus, excellent thermal stability, and good chemical compatibility with polymer matrices. The incorporation of Al_2O_3 particles into UHMWPE has been widely recognized as an effective approach to improve the structural integrity, stiffness, and wear resistance of polymer composites. Recent studies have reported that the reinforcing efficiency of ceramic particles depends strongly on their dispersion within the UHMWPE matrix and the quality of the particle–matrix interface. A homogeneous particle distribution facilitates efficient stress transfer, improves resistance to plastic deformation, and enhances tribological performance, whereas particle agglomeration may introduce localized stress concentrations that reduce the effectiveness of reinforcement. These findings highlight that both filler content and particle dispersion are critical factors governing the overall mechanical and

tribological performance of UHMWPE/ Al_2O_3 composites [1].

Recent investigations into UHMWPE-based composites have emphasized enhancing friction and wear performance by incorporating hard inorganic fillers under lubricated sliding conditions. According to Gangwani et al., the addition of nano- TiO_2 together with selected micro-fillers can improve tribological behavior in water-lubricated environments, leading to reduced friction and wear. These improvements are generally associated with better load-bearing capability, decreased material removal, and the development of a more stable transfer layer at the contact interface [2]. Although Al_2O_3 was not specifically examined in that study, the results are consistent with the broader understanding that rigid inorganic particles can influence interfacial interactions and contribute to improved wear resistance and tribological stability in UHMWPE-based composites.

Okhlopko et al. reported that the incorporation of inorganic fillers into UHMWPE can effectively improve its mechanical and tribological performance. The study demonstrated that the mechanical properties are strongly governed by the uniform dispersion of fillers and the quality of the polymer–filler interfacial bonding. A refined and homogeneous microstructure reduced structural defects and stress concentration, thereby enhancing load transfer and improving the overall performance of UHMWPE composites. These findings provide important guidelines for

developing high-performance UHMWPE-based engineering composites. [3]

Radhakrishnan et al. [4] investigated the effect of alumina (Al_2O_3) microparticles (0–4 wt.%) incorporated into the epoxy matrix of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites fabricated by the hand lay-up process. The SEM observations confirmed a uniform dispersion of Al_2O_3 particles with minimal agglomeration, leading to increased density and reduced porosity. The incorporation of Al_2O_3 significantly improved hardness, tensile strength, flexural strength, and interlaminar shear strength through enhanced interfacial bonding and load transfer between the fiber and matrix. However, the impact strength decreased as the alumina content increased due to the higher brittleness introduced by the ceramic particles.

The effects of ceramic reinforcement on UHMWPE have been widely investigated. Duraccio et al. [5] reported that alumina–zirconia particles significantly improved the stiffness and strength of UHMWPE while maintaining good biocompatibility, highlighting their potential for orthopedic applications. Bensaada et al. [6] demonstrated that alumina coatings deposited on UHMWPE provided strong interfacial bonding and enhanced surface hardness and mechanical durability.

Similarly, Mohammed [7] showed that Al_2O_3 nanoparticle reinforcement improved wear resistance and reduced friction under sliding conditions. Alil et al. [8] reported that UHMWPE exhibited high tensile strength and elastic modulus

while maintaining stable mechanical behavior over a wide range of quasi-static strain rates. The material showed predominantly elastoplastic deformation with limited strain-rate sensitivity, indicating its excellent load-bearing capability and structural stability for engineering applications, while Latief et al. [9] reported that incorporating Al_2O_3 particles significantly improved the tensile strength, elastic modulus, and hardness of polymer composites when the particles were uniformly dispersed. However, excessive Al_2O_3 loading promoted particle agglomeration and void formation, leading to deterioration in mechanical performance. These findings indicate that optimizing filler content and achieving homogeneous particle dispersion are essential for maximizing the reinforcing efficiency of Al_2O_3 in polymer composites.

In addition, ceramic-reinforced polyethylene composites have been investigated to understand the general strengthening mechanism of polymer composites. Di Maro et al. [10] reported that high-density polyethylene reinforced with alumina-toughened zirconia particles exhibited improved mechanical strength and wear resistance, confirming the effectiveness of ceramic particle reinforcement in enhancing the performance of polyethylene-based materials.

Although previous studies have demonstrated that Al_2O_3 reinforcement improves the mechanical, tribological, and thermal properties of UHMWPE composites, challenges remain in

achieving uniform particle dispersion and optimizing filler characteristics. Hussain et al. [11] emphasized that enhancing the mechanical rigidity and thermal performance of UHMWPE remains a major research challenge for advanced engineering and biomedical applications. Therefore, further investigation is required to clarify the effects of Al_2O_3 particle loading on the mechanical, thermal, and microstructural properties of UHMWPE composites.

Recent developments in UHMWPE-based composites have focused on incorporating ceramic fillers and nanoparticles to enhance mechanical and thermal performance. Lei Li et al. [12] reviewed recent advances in high-performance UHMWPE materials and reported that ceramic and nano-scale reinforcements significantly improve structural rigidity, thermal stability, and long-term durability. The study highlighted the growing importance of multifunctional polymer composites that simultaneously enhance mechanical and thermal properties for engineering applications.

Among the various ceramic reinforcements investigated, aluminum oxide (Al_2O_3) has attracted considerable attention because of its high hardness, high elastic modulus, excellent thermal stability, and good compatibility with polymer matrices. Hussain et al. [13] investigated biomedical-grade UHMWPE reinforced with nano- Al_2O_3 particles and reported substantial improvements in tribological behavior and wear resistance. The authors concluded that ceramic

particles effectively enhance load-bearing capability and reduce material degradation under mechanical loading conditions.

The incorporation of Al_2O_3 as a ceramic reinforcement effectively improves the stiffness and elastic modulus of polyethylene-based composites while maintaining excellent thermal stability. Uniform particle dispersion enhances interfacial bonding and load transfer efficiency, whereas optimized Al_2O_3 content contributes to superior mechanical performance and structural reliability for engineering applications [14].

More recently, Liu et al. [15] reported that ceramic-filled UHMWPE composites exhibit improved friction and wear behavior due to the synergistic interaction between the polymer matrix and rigid ceramic particles. The incorporation of ceramic fillers was found to reduce surface damage, improve load transfer mechanisms, and enhance the overall durability of UHMWPE under severe operating conditions.

Efficient interfacial bonding and optimized Al_2O_3 distribution enhance stress transfer and suppress crack propagation within UHMWPE composites, resulting in improved structural integrity and mechanical performance. These findings support the effectiveness of ceramic reinforcement for high-performance polymer composites used in engineering applications [16].

Although Al_2O_3 has been widely used to reinforce UHMWPE composites, comprehensive studies on micron-sized B-grade Al_2O_3 over a broad filler-content

range remain limited. Therefore, this study systematically investigates the effects of Al₂O₃ loading on the tensile properties, hardness, impact strength, thermal conductivity, and microstructural characteristics of UHMWPE composites fabricated by hot compression molding.

2. Research Methodology

2.1 Materials

UHMWPE was selected as the polymer matrix due to its excellent wear resistance, high impact strength, exceptional ductility, low density, and good toughness, making it suitable for lightweight engineering and tribological applications. However, its relatively low stiffness and thermal stability limit its use in certain structural applications. To overcome these limitations, aluminum oxide (Al₂O₃) was introduced as a ceramic reinforcement. Al₂O₃ exhibits excellent mechanical properties, including a high elastic modulus, high compressive strength, and outstanding thermal stability with a melting temperature above 2,000 °C, making it an effective reinforcement for improving the stiffness, strength, and thermal resistance of polymer composites. The fundamental physical and mechanical properties of the constituent materials are summarized in **Tables 1** and **2**.

Therefore, the combination of UHMWPE as a ductile polymer matrix and Al₂O₃ as a rigid ceramic reinforcement creates a complementary composite system. The polymer matrix provides flexibility and impact resistance, while the ceramic particles enhance stiffness, strength, and thermal stability,

Table 1 Properties of UHMWPE [17]

Properties	Value	Unit
Density	0.93	g/cm ³
Bulk density	≥ 0.40	g/cm ³
Intrinsic viscosity [η]	2,300	ml/g
Average molecular weight (cal.)	5.5x10 ⁶	g/mol
Average particle size, X50	150	μm
Tensile strength at yield	22	MPa
Tensile strength at break	35	MPa
Ultimate elongation	≥ 300	%
Izod impact strength	NB	J/m
Hardness	63	Shore D
Melting temperature (10°C/min)	130-135	°C
Vicat softening point (1kg)	125-128	°C

Table 2 Properties of Aluminum Oxide (Al₂O₃) [17]

Properties	Al ₂ O ₃
Molecular weight (10 ⁶ g/mol)	101.96
Melting temperature (°C)	2,072
Poisson’s ratio	0.22
Specific gravity (g/cm ³)	3.96
Tensile modulus of elasticity* (GPa)	370
Compressive Strength (MPa)	2,600
Tensile ultimate strength* (MPa)	260
Fracture Toughness MPa-m ^{1/2}	4
Density (g/cc)	3.9

thereby improving the overall mechanical and thermal performance of the UHMWPE/Al₂O₃ composites investigated in this study.

2.2 Materials and Composite Preparation

UHMWPE powder was used as the polymer matrix because of its excellent

wear resistance and impact properties. Al_2O_3 particles (average size: 5 μm) were incorporated into the UHMWPE matrix at 5, 8, 10, 12, 15, 20, and 25 wt% to evaluate the effects of filler loading on the mechanical and thermal properties of the composites.

The composite materials were prepared by mechanical mixing followed by hot compression molding. The blended UHMWPE and Al_2O_3 powders were placed in a steel mold and consolidated under controlled temperature and pressure to produce composite sheets. After molding, the sheets were cooled to room temperature and machined into standard specimens for mechanical, thermal, and microstructural characterization.

The equipment and characterization methods employed in this study are summarized as follows:

1. Material preparation: The constituent materials were weighed using a high-precision analytical balance (ATX224R, Shimadzu, Japan) with a resolution of 0.0001 g (0.1 mg). A hot-air drying oven (Binder FD 53L, Germany) was used to dry and thermally condition the powders prior to processing.

2. Powder dispersion and composite fabrication: A high-speed homogenizer and an ultrasonic disperser were used to achieve homogeneous dispersion of Al_2O_3 particles within the UHMWPE powder. Composite sheets were then fabricated using a specially designed steel mold and a hot compression press.

3. Specimen preparation: After molding, the composite sheets were

machined to the required dimensions using a band saw, milling machine, and abrasive sandpaper in accordance with the relevant testing standards.

4. Mechanical characterization: Tensile tests were performed according to ASTM D638 using a universal testing machine, while Shore D hardness was measured in accordance with ASTM D2240.

5. Microstructural and thermal characterization: Optical microscopy (OM) was employed for preliminary microstructural observation, and scanning electron microscopy (SEM, JEOL JSM-IT300) was used for detailed morphological analysis. Differential scanning calorimetry (DSC) was conducted to evaluate thermal behavior, whereas Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR, Bruker Tensor 27) was used to investigate the chemical structure and molecular bonding of the composites.

UHMWPE powder was used as the polymer matrix and blended with aluminum oxide (Al_2O_3) particles with an average particle size of 5 μm (calcined B-grade) as the reinforcing filler. Prior to the mixing process, the Al_2O_3 particles were subjected to a de-agglomeration treatment to reduce particle clustering and improve dispersion within the polymer matrix. This step was performed using an ultrasonic disperser for 10 min, with methanol employed as the dispersion medium. The ultrasonic treatment facilitated the separation of agglomerated particles and promoted a more uniform distribution of the filler.

Following the dispersion process, the Al_2O_3 particles were mixed with UHMWPE powder using a high-speed homogenizer operating at 32,000 rpm for 10 min. Methanol was used as a processing medium during the homogenization step to assist in achieving a more homogeneous mixture of the polymer and ceramic particles. The use of methanol also enhanced particle mobility and improved the mixing efficiency between UHMWPE and Al_2O_3 .

Moreover, methanol was selected because it can be readily removed through natural evaporation after the mixing process, leaving a uniformly UHMWPE/ Al_2O_3 composite powder suitable for subsequent composite fabrication and processing.

After the powder mixing process, the blended UHMWPE/ Al_2O_3 composite powders were consolidated using a hot compression molding technique. The prepared powder mixture was placed into a steel compression mold with dimensions of 160×80×50 mm. The molding process was carried out at a temperature of 140 °C under a pressure of 10 MPa using a hydraulic compression press. The material was maintained under these conditions for a holding time of 30 min to ensure complete melting and consolidation of the UHMWPE matrix as well as adequate distribution of the Al_2O_3 particles within the polymer structure.

After the holding stage, the mold was gradually cooled to room temperature while maintaining pressure in order to minimize internal residual stresses and ensure dimensional stability of the

composite plate. The cooling process was performed at an approximate cooling rate of 5 °C/min until the mold temperature reached approximately 40 °C, after which the molded composite plate was removed from the mold. The resulting plates exhibited dimensions corresponding to the mold cavity with an approximate thickness of 10 mm.

Subsequently, the molded composite plates were machined into tensile test specimens using a milling machine to achieve the required geometry and dimensional accuracy. The tensile specimens were prepared according to the ASTM D638 standard (Type I) for polymer materials. The specimen geometry, including the gauge length, width, and thickness, complied with the specified ASTM requirements to ensure reliable mechanical testing.

2.3 Specimen Conditioning

Prior to all mechanical and thermal characterization, the prepared UHMWPE/ Al_2O_3 composite specimens were conditioned under controlled laboratory conditions in order to minimize the influence of environmental factors on the measured properties. All specimens were stored at 23 ± 2 °C and $50 \pm 5\%$ relative humidity for at least 40 h before testing. This conditioning procedure ensured that the specimens reached equilibrium with the surrounding environment and improved the reliability and repeatability of the experimental results. Unless otherwise stated, all experimental results reported in this study are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

2.4 Tensile Testing

The tensile properties of the UHMWPE/Al₂O₃ composites were evaluated according to ASTM D638 using Type I specimens machined from the compression-molded plates. Tensile tests were performed at room temperature using a universal testing machine with a crosshead speed of 5 mm/min. The engineering stress–strain curves were used to determine the yield strength, ultimate tensile strength (UTS), elastic modulus, and elongation at break. For each composition, five specimens were tested, and the results are reported as mean $\pm$ standard deviation. The engineering stress and strain were calculated using:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

where σ is the tensile stress (MPa), F is the applied load (N), and A is the cross-sectional area of the specimen (mm²).

The engineering strain was determined from the change in gauge length:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

where ε is the engineering strain (dimensionless), L_0 is the original gauge length (mm), and L is the final length under load (mm).

The elastic modulus was determined from the initial linear region of the stress–strain curve according to Hooke's law.

2.5 Thermal Conductivity Measurement

The thermal conductivity of the UHMWPE/Al₂O₃ composites was

measured using a Hot Disk Thermal Constants Analyzer based on the Transient Plane Source (TPS) method. For each composite composition, three specimens were tested, and the reported values represent the mean $\pm$ standard deviation. The thermal conductivity was evaluated according to Fourier's law:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

where q is the heat transfer rate (W), k is the thermal conductivity (W·m⁻¹·K⁻¹), A is the cross-sectional area normal to heat flow (m²), and dT/dx is the temperature gradient across the material (K·m⁻¹).

2.6 Hardness Measurement

The surface hardness of the UHMWPE/Al₂O₃ composites was determined using a Shore D durometer in accordance with ASTM D2240. For each composite formulation, three specimens were tested. On each specimen, hardness measurements were taken at five different locations distributed across the specimen surface to minimize the influence of local material heterogeneity.

Consequently, a total of 15 hardness readings were obtained for each composite composition. The reported Shore D hardness value represents the average of these 15 measurements, and the results are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

2.7 Impact Strength Test

The impact resistance of the composites was evaluated using the notched Izod impact test according to

ASTM D256. The specimens were prepared with approximate dimensions of 12.7 mm in width and 10 mm in thickness, with a V-notch depth of 2.54 mm introduced at the center of the specimen. The notch was designed to create a controlled stress concentration region and to promote consistent fracture behavior during impact loading.

Impact testing was performed using a notched Izod pendulum impact tester. For each composite composition, five specimens were tested, and the absorbed impact energy was recorded for each specimen. The impact strength was calculated and reported in J/m, representing the energy absorbed by the material before fracture.

2.8 Statistical Analysis and Reliability of Measurements

To ensure the reliability and reproducibility of the experimental data, multiple specimens were tested for each characterization technique. Mechanical and impact tests were conducted using at least five specimens for each composition, while thermal conductivity measurements were performed on three specimens for each composition. Hardness measurements were obtained from 15 readings per composition. All experimental results presented in this study are therefore reported in the form of mean $\pm$ standard deviation, providing a statistically reliable basis for comparing the properties of the different UHMWPE/Al₂O₃ composite formulations. In addition, statistical analysis was performed to evaluate the significance of the differences among the

composite formulations. One-way analysis of variance (ANOVA) was employed to compare the mean values of tensile strength, elastic modulus, hardness, impact strength, and thermal conductivity for the different Al₂O₃ contents. A significance level of 95% confidence ($p < 0.05$) was adopted throughout the study.

When significant differences were identified by ANOVA, Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) post-hoc test was conducted to determine which composite formulations differed significantly from each other. Statistical calculations were performed using SPSS software.

3. Research results

3.1 FTIR Analysis

The Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) spectra of pristine UHMWPE powder, compression-molded UHMWPE processed at 140 °C under a pressure of 10 MPa, and UHMWPE/Al₂O₃ composites containing 5–25 wt% Al₂O₃ are presented in **Figure 1**. All samples exhibited the characteristic absorption bands of UHMWPE, indicating that the primary chemical structure of the polymer was preserved after the molding process and the incorporation of ceramic particles.

Figure 1 presents the FTIR spectra of pristine UHMWPE powder, compression-molded UHMWPE, and UHMWPE/Al₂O₃ composites containing 5–25 wt% Al₂O₃ particles with an average particle size of 5 μ m. The spectra reveal that all composite specimens retain the characteristic absorption bands of UHMWPE, indicating that the hot

compression molding process at 140 °C and 10 MPa, together with the incorporation of Al₂O₃ particles, did not alter the fundamental molecular structure of the polymer matrix. The two prominent absorption bands located at 2915 cm⁻¹ and 2848 cm⁻¹ correspond to the asymmetric and symmetric stretching vibrations of the methylene (CH₂) groups, respectively.

These characteristic peaks remain at the same positions for all composite compositions, although a slight reduction in absorbance intensity is observed as the Al₂O₃ content increases. The absence of any noticeable peak shift demonstrates that the polyethylene backbone remains chemically stable after particle incorporation and compression molding.

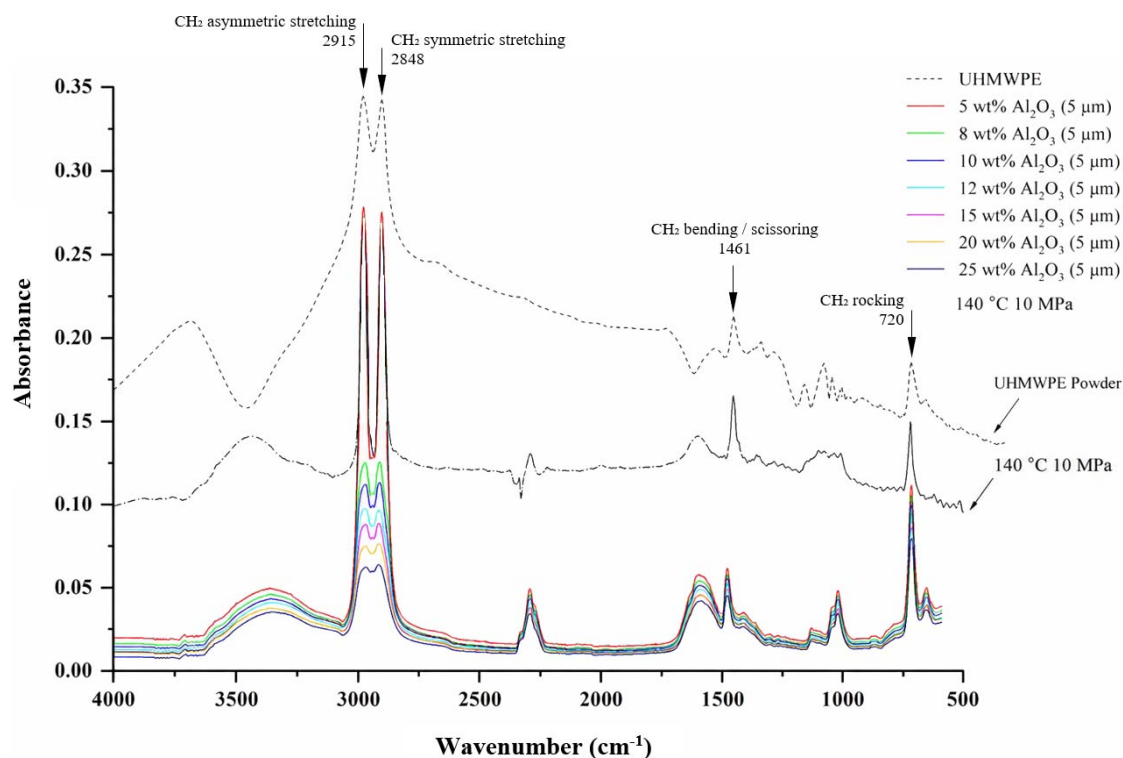


Figure 1 FTIR spectra of pristine UHMWPE powder, compression-molded UHMWPE, and UHMWPE/Al₂O₃ composites containing 5–25 wt% Al₂O₃.

Another characteristic absorption band is observed at 1461 cm⁻¹, which is assigned to the CH₂ bending (scissoring) vibration. This peak is clearly preserved in every composite formulation without any measurable displacement, indicating that the local molecular environment surrounding the polyethylene chains is

essentially unchanged. This observation further confirms that Al₂O₃ particles do not chemically modify the UHMWPE molecular structure.

The characteristic crystalline polyethylene band at 720 cm⁻¹, corresponding to the CH₂ rocking vibration, is also retained in all specimens.

The persistence of this absorption band indicates that the crystalline structure of UHMWPE remains intact after the addition of ceramic particles. Although the absorbance intensity gradually decreases with increasing Al_2O_3 loading, the peak position remains unchanged, suggesting that the reduction originates primarily from the dilution effect caused by the increasing ceramic fraction rather than from structural degradation of the polymer.

Overall, the FTIR spectra show no new absorption bands, no significant peak shifts, and no disappearance of the characteristic UHMWPE absorption bands after the incorporation of Al_2O_3 particles. These findings demonstrate that the reinforcement mechanism is predominantly physical rather than chemical, where Al_2O_3 particles are mechanically dispersed within the UHMWPE matrix without forming new chemical bonds. Consequently, the improvements in the mechanical and thermal properties observed in this study are primarily attributed to enhanced interfacial stress transfer between the ceramic particles and the polymer matrix while preserving the intrinsic molecular structure of UHMWPE.

3.2 Microstructural Observation

Microstructural analysis of the composites revealed the dispersion behavior of Al_2O_3 particles within the UHMWPE matrix. The microstructure images are presented in **Figure 2** and **3**. The microstructure of the UHMWPE powder exhibits agglomerated spheroidal

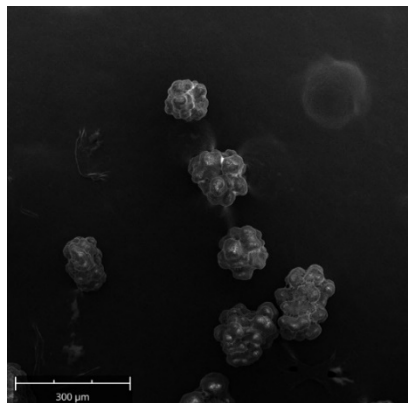


Figure 2 UHMWPE

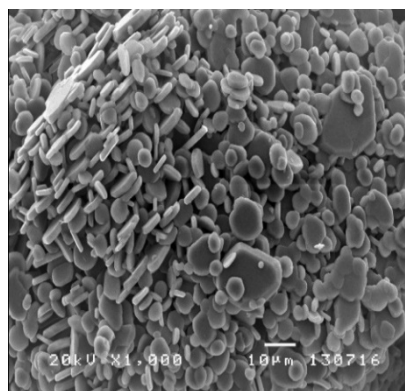


Figure 3 Calcined Al_2O_3 B grade $\times 1000$

particles distributed randomly throughout the observed region without any preferred orientation. Based on the 300 μm scale bar, the agglomerate size is estimated to range from approximately 50 to 200 μm . Such clustered morphology is commonly observed in UHMWPE powders produced by polymerization and is primarily attributed to van der Waals attraction together with mechanical interlocking between neighboring polymer particles. The particle surfaces exhibit a relatively rough and granular texture with numerous micro-scale irregularities. This rough morphology increases the effective surface area available for interaction with reinforcing particles and is expected to

promote stronger interfacial adhesion between the UHMWPE matrix and Al_2O_3 particles. During hot compression molding, these irregular surface features also facilitate mechanical interlocking, leading to improved consolidation and a more cohesive composite structure. Consequently, the observed powder morphology provides favorable conditions for efficient load transfer across the particle–matrix interface and plays an important role in determining the mechanical and thermal performance of the resulting UHMWPE/ Al_2O_3 composites.

Figure 4 shows SEM micrographs of fracture surfaces of UHMWPE reinforced with 0–25 wt.% Al_2O_3 , where the morphology evolves with increasing filler content, indicating that ceramic particles significantly influence crack propagation, particle–matrix interaction, and overall fracture behavior, consistent with the mechanical results from tensile, hardness, and impact tests. Neat UHMWPE (0 wt.% Al_2O_3) exhibits a smooth, layered morphology with elongated lamellae and fibrillar deformation, reflecting ductile fracture dominated by plastic flow and molecular chain stretching, while the absence of particles confirms a homogeneous matrix with high ductility. With the addition of 5 wt.% Al_2O_3 , the fracture surface becomes rougher with uniformly dispersed particles and no evident agglomeration, and the tortuous crack path suggests effective crack interruption and increased fracture energy, supported by good interfacial adhesion indicated by minimal particle pull-out. At 8 wt.% Al_2O_3 , the surface becomes denser

with oriented micro-ridges and fewer voids, where well-dispersed particles enable efficient stress transfer, reducing stress concentration and enhancing strength and modulus. Increasing the content to 10 wt.% Al_2O_3 results in greater irregularity and crack deflection, with crack branching indicating repeated interruption by particles, thereby increasing fracture energy and confirming effective particle–matrix bonding. At 12 wt.% Al_2O_3 , the morphology remains compact with uniformly distributed particles and limited clustering, maintaining effective load transfer and stress redistribution and leading to balanced mechanical properties. However, at 15 wt.% Al_2O_3 , initial particle agglomeration appears, and these clusters act as stress concentration sites that promote microcrack initiation and reduce ductility despite increased stiffness and hardness. At 20 wt.% Al_2O_3 , larger agglomerates and voids create a heterogeneous structure that disrupts matrix continuity, facilitates crack initiation, and reduces fracture toughness. At 25 wt.% Al_2O_3 , severe agglomeration and numerous microvoids are observed, and crack propagation occurs along particle-rich regions, indicating a transition from ductile to brittle fracture and explaining the reduced elongation at break. Overall, the SEM results demonstrate that low Al_2O_3 contents (5–12 wt.%) enhance particle dispersion, stress transfer, and crack resistance, thereby improving mechanical performance, whereas high contents (15–25 wt.%) lead to agglomeration, stress

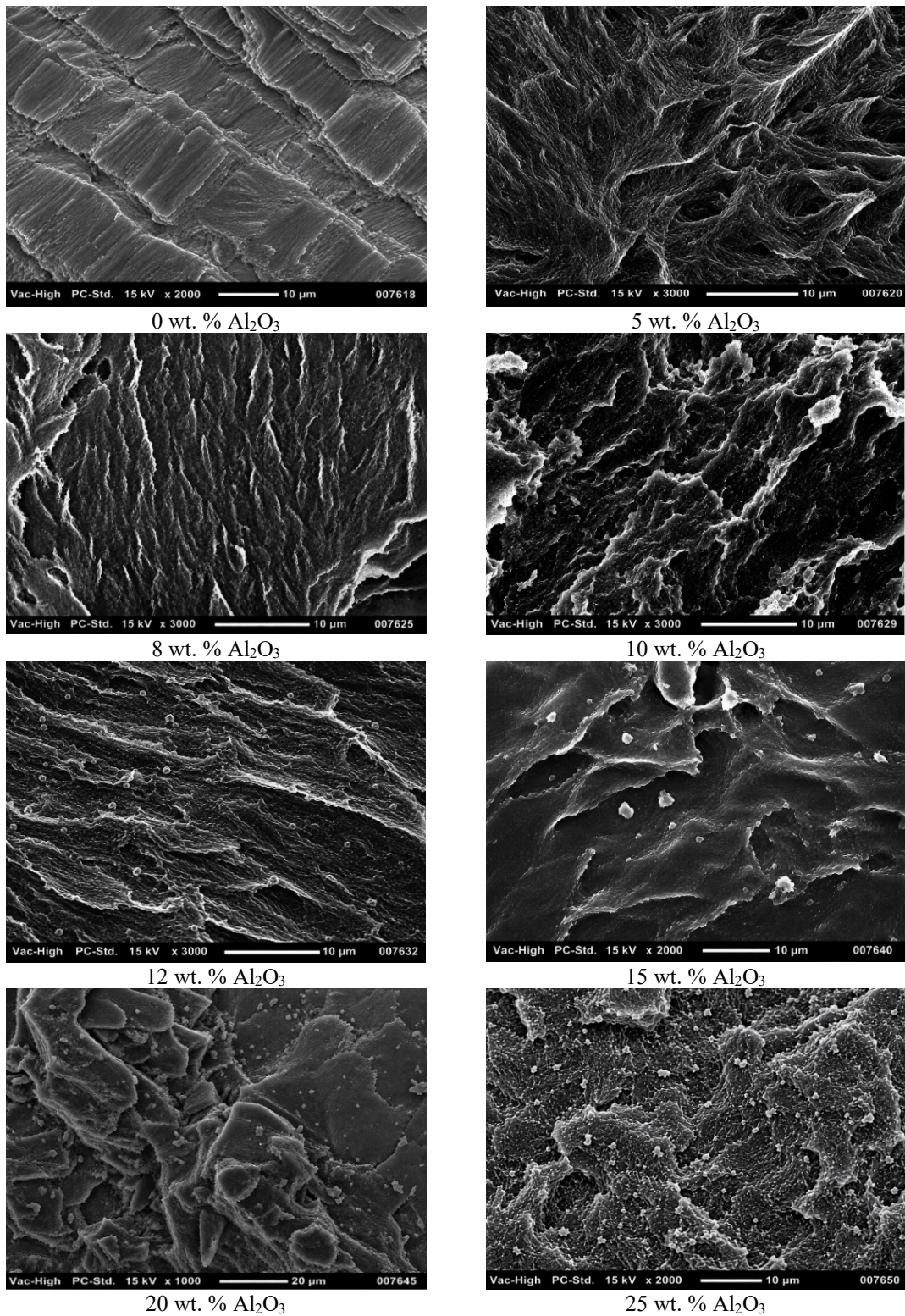


Figure 4. SEM micrographs of the fracture surfaces of UHMWPE/ Al_2O_3 composites reinforced with 5 μm Al_2O_3 particles: (a) neat UHMWPE, (b) 5 wt.%, (c) 8 wt.%, (d) 10 wt.%, (e) 12 wt.%, (f) 15 wt.%, (g) 20 wt.%, and (h) 25 wt.% Al_2O_3

concentration, and reduced ductility, confirming that particle dispersion is a critical factor governing the performance of UHMWPE/Al₂O₃ composites.

3.3 Tensile Properties of UHMWPE /Al₂O₃ Composites

Table 3 summarizes the tensile mechanical properties of UHMWPE/Al₂O₃ composites with different Al₂O₃ contents. The evaluated parameters include yield strength, ultimate tensile strength (UTS), breaking strength, elongation at break, and elastic modulus. The results demonstrate that the incorporation of Al₂O₃ B-grade particles significantly influences the mechanical behavior of the UHMWPE matrix.

A clear trend can be observed in the elastic modulus of the composites. As the Al₂O₃ content increases from 5 wt% to 25 wt%, the modulus of elasticity increases steadily from 796.62 MPa to 1229.64 MPa. This increase indicates that the stiffness of the composite material improves with the addition of ceramic reinforcement. The improvement can be attributed to the inherently high stiffness of Al₂O₃ particles compared with the UHMWPE matrix. When these rigid particles are dispersed within the polymer matrix, they act as load-bearing components that resist deformation under applied stress. Consequently, the overall rigidity of the composite increases as the filler content increases.

In contrast to the elastic modulus, the yield strength shows a gradual decrease with increasing Al₂O₃ content. The yield strength decreases from 12.41

Table 3 Experimental tensile properties of UHMWPE reinforced with Al₂O₃ particles at different compositions.

Composition	Yield Strength	UTS	Breaking Strength	Elongation at Break	Modulus of Elasticity
UHMWPE + Al ₂ O ₃	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)
Al ₂ O ₃ 5% [17]	12.41	29.20	26.01	254.24	796.62
Al ₂ O ₃ 8% [17]	12.21	29.16	28.52	256.42	847.66
Al ₂ O ₃ 10% [17]	10.88	29.57	28.95	239.52	907.99
Al ₂ O ₃ 12%	10.59	29.60	30.46	238.56	945.48
Al ₂ O ₃ 15%	9.73	29.80	32.28	230.60	1011.05
Al ₂ O ₃ 20%	8.63	30.06	34.77	219.39	1120.34
Al ₂ O ₃ 25%	7.54	30.33	37.27	208.19	1229.64

MPa at 5 wt% Al₂O₃ to 7.54 MPa at 25 wt% Al₂O₃. This reduction suggests that although the composite becomes stiffer, its resistance to the onset of plastic deformation is reduced. One possible explanation is the presence of stress concentration around the rigid ceramic particles. At higher filler contents, the particle–matrix interface may act as localized stress concentration sites, which can initiate micro-damage or early yielding within the polymer matrix.

The ultimate tensile strength (UTS) remains relatively stable across all compositions, ranging from approximately 29.16 MPa to 30.33 MPa. This result indicates that the addition of Al₂O₃ particles does not significantly alter the maximum tensile load that the material can withstand before necking or failure begins. The relatively constant UTS suggests that the load transfer between the UHMWPE matrix and the Al₂O₃ particles

remains effective across the range of filler concentrations examined.

A different trend is observed for the breaking strength, which increases notably with increasing Al_2O_3 content. The breaking strength increases from 26.01 MPa at 5 wt% Al_2O_3 to 37.27 MPa at 25 wt% Al_2O_3 . This improvement indicates that the reinforced composites are capable of sustaining higher stresses near the point of fracture. The presence of ceramic particles can contribute to improved resistance against crack propagation by redistributing stresses within the material. As a result, the composite can maintain higher stress levels prior to final fracture compared with the unreinforced matrix.

The elongation at break shows a decreasing trend as the Al_2O_3 content increases. The elongation decreases from 254.24% at 5 wt% Al_2O_3 to 208.19% at 25 wt% Al_2O_3 . This reduction in ductility is a common characteristic of particle-reinforced polymer composites. The rigid ceramic particles restrict the mobility and sliding of polymer chains during tensile deformation, thereby limiting the plastic deformation capability of the material. Consequently, the composites become less ductile as the filler concentration increases.

One-way ANOVA analysis indicated that the addition of Al_2O_3 particles significantly affected the tensile strength and elastic modulus of the composites ($p < 0.05$). Post-hoc Tukey analysis revealed that composites containing 15–25 wt% Al_2O_3 exhibited statistically higher stiffness than neat UHMWPE. These

findings confirm that the observed improvement in mechanical performance was not due to experimental variability but resulted from the reinforcing effect of the ceramic particles.

3.4 Thermal Conductivity

The thermal conductivity of the UHMWPE/ Al_2O_3 composites is summarized in **Figure 5**. The results show that thermal conductivity increased from approximately 0.40 W/m·K to 0.49 W/m·K with the addition of Al_2O_3 particles.

Figure 5 presents the measured thermal conductivity of UHMWPE/ Al_2O_3 composites as a function of Al_2O_3 filler content. The results show a clear and monotonic increase in thermal conductivity with increasing Al_2O_3 content, indicating that the incorporation of ceramic particles enhances the heat-transfer capability of the UHMWPE matrix. The measured thermal conductivity of neat UHMWPE is approximately 0.400 Wm⁻¹K⁻¹, and it gradually increases to 0.414, 0.431, 0.448, 0.469, and 0.491 Wm⁻¹K⁻¹ at Al_2O_3 contents of 5, 10, 15, 20, and 25 wt%, respectively. This trend suggests that the addition of Al_2O_3 particles effectively improves thermal transport within the composite structure.

The increase in thermal conductivity can be primarily attributed to the significantly higher intrinsic thermal conductivity of Al_2O_3 compared with that of the UHMWPE matrix. UHMWPE is inherently a thermally insulating polymer, and heat transfer in such materials is mainly governed by phonon transport

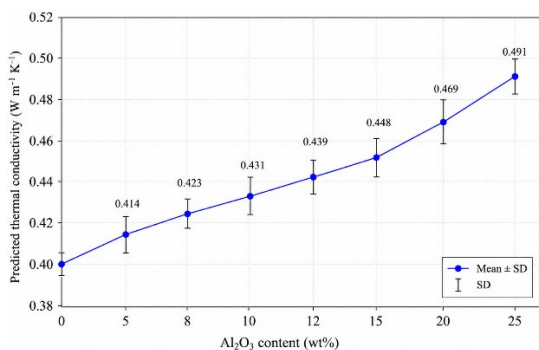


Figure 5 Thermal Conductivity

through disordered molecular chains. As a result, neat UHMWPE generally exhibits low thermal conductivity. When Al₂O₃ particles are introduced into the matrix, they act as thermally conductive domains that facilitate heat flow through the composite. With increasing filler content, the interparticle distance decreases, thereby increasing the probability of particle-to-particle thermal interaction and forming more effective heat-conduction pathways.

Another important feature observed in the graph is that the thermal conductivity does not increase linearly at a constant rate, but rather shows a slightly accelerated increase at higher Al₂O₃ contents. For example, the increase from 0 to 5 wt% is relatively small, whereas the increment becomes larger as the filler content approaches 20–25 wt%. This behavior may be associated with the gradual development of a more interconnected thermal transport network within the composite. At low filler contents, the Al₂O₃ particles are likely dispersed as isolated domains within the polymer matrix, and the heat-transfer improvement is therefore limited. However, as the filler fraction increases,

the particles become closer to each other, which reduces thermal resistance between adjacent particles and promotes the formation of conductive pathways. Although the graph does not indicate a sharp percolation threshold, the progressive increase suggests the onset of more efficient thermal transport at higher filler loadings.

From a microstructural point of view, the enhanced thermal conductivity may also be related to improved load-bearing continuity and reduced phonon scattering along the particle-rich regions of the composite. In polymer composites, thermal transport is often limited by interfacial thermal resistance between the filler and the matrix. Therefore, the fact that the measured conductivity still increases despite this limitation implies that the contribution of Al₂O₃ as a thermally conductive phase is sufficiently significant to overcome part of the interfacial resistance. Nevertheless, the overall thermal conductivity values remain within the sub-1 Wm⁻¹K⁻¹ range, which indicates that the composite still behaves as a polymer-dominant thermal conductor rather than a highly conductive ceramic-rich material. This is expected because the UHMWPE matrix remains the major phase even at 25 wt% Al₂O₃.

The overall increase from 0.400–0.491 Wm⁻¹K⁻¹ corresponds to an improvement of approximately 22.75% at 25 wt% Al₂O₃ relative to neat UHMWPE. This enhancement is meaningful for engineering applications where moderate improvement in heat dissipation is desirable without sacrificing the

lightweight and processability advantages of polymeric materials. In practical terms, such an increase may contribute to improved thermal stability during service, reduced local heat accumulation, and better performance in components subjected to frictional or repetitive mechanical loading.

The results further suggest that Al_2O_3 is an effective thermally functional filler for UHMWPE, particularly when the objective is to improve heat transfer while maintaining the overall characteristics of a polymer composite. However, the magnitude of improvement remains moderate, implying that additional strategies may be required if substantially higher thermal conductivity is targeted. These strategies may include optimization of particle size and shape, surface treatment to reduce interfacial thermal resistance, hybridization with other conductive fillers, or improved dispersion techniques to enhance the formation of continuous thermal pathways.

3.5 Durometer Hardness (Shore D) of UHMWPE/ Al_2O_3 Composites

The Shore D hardness results of the UHMWPE/ Al_2O_3 B-grade composites are presented in **Table 4** according to ASTM D2240 with a dwell time of 15 s. The experimental results indicate that the hardness of the composites increased progressively with increasing Al_2O_3 content. Specifically, the hardness value increased from 56.6 Shore D for the composite containing 5 wt% Al_2O_3 to 67.8 Shore D for the composite containing 25 wt% Al_2O_3 . This trend clearly demonstrates that the incorporation of ceramic particles significantly enhances

Table 4 Shore D hardness of UHMWPE/ Al_2O_3 composites at different Al_2O_3 B-grade contents

Composition	Durometer Hardness (Shore D)
UHMWPE 95%+ Al_2O_3 B-grade 5%	56.6 [17]
UHMWPE 92%+ Al_2O_3 B-grade 8%	58.4 [17]
UHMWPE 90%+ Al_2O_3 B-grade 10%	59.2 [17]
UHMWPE 88%+ Al_2O_3 B-grade 12%	60.8
UHMWPE 85%+ Al_2O_3 B-grade 15%	63.4
UHMWPE 80%+ Al_2O_3 B-grade 20%	65.6
UHMWPE 75%+ Al_2O_3 B-grade 25%	67.8

the surface resistance of the UHMWPE matrix against localized deformation.

The observed increase in hardness can be attributed to the intrinsic mechanical properties of alumina particles. Al_2O_3 is a ceramic material characterized by high hardness and stiffness; therefore, its incorporation into the polymer matrix introduces rigid load-bearing phases within the composite structure. When external indentation force is applied during the Shore D hardness test, the presence of these rigid particles reduces the ability of the polymer matrix to deform plastically under the indenter. Consequently, the composite surface exhibits higher resistance to penetration, resulting in increased hardness values.

In addition to the direct contribution of the ceramic particles, the increase in hardness is also related to the restriction of molecular chain mobility within the

UHMWPE matrix. As the filler content increases, the movement and sliding of polymer chains become increasingly constrained by the dispersed Al_2O_3 particles. This restriction leads to a stiffer composite structure and limits localized plastic deformation under the indenter tip. As a result, the composite behaves as a harder material compared with the neat or low-filler UHMWPE systems.

The relatively steady increase in hardness observed across the filler range from 5 to 25 wt% suggests that the reinforcement effect of Al_2O_3 remains effective within this composition range. The absence of a decrease in hardness at higher filler contents indicates that the particle distribution remains sufficiently effective to contribute to surface strengthening. However, it should be noted that excessive ceramic loading in polymer composites may lead to particle agglomeration, which can potentially reduce reinforcement efficiency and introduce local stress concentration sites.

The increase in Shore D hardness observed in this study is consistent with the general behavior reported for polymer composites reinforced with ceramic particles. In many polymer–ceramic systems, the addition of rigid fillers improves surface hardness, stiffness, and wear resistance due to the enhanced load transfer between the matrix and reinforcement phases. Therefore, the present results confirm that Al_2O_3 B-grade particles serve as an effective reinforcement for enhancing the surface mechanical performance of UHMWPE. From an application perspective, the

improved hardness of UHMWPE/ Al_2O_3 composites indicates their potential suitability for engineering components that require enhanced resistance to surface indentation, abrasion, and wear. Such applications may include sliding elements, bearing components, liners, and protective surfaces where improved durability and mechanical stability are required. However, while hardness improves with increasing filler content, it is important to consider the balance between hardness and other mechanical properties, particularly ductility and toughness, in order to achieve optimal composite performance for specific engineering applications.

3.6 Impact Strength of UHMWPE/ Al_2O_3 Composites

Impact testing was performed using the notched Izod method according to ASTM D256 using a pendulum energy of 5.5 J. The specimens were prepared with dimensions of approximately 12.7 mm in width and 10 mm in thickness, with a V-notch depth of 2.54 mm. The notch was introduced to create a stress concentration region that promotes controlled fracture during impact loading. The absorbed impact energy was recorded and used to evaluate the impact resistance of the UHMWPE/ Al_2O_3 composites.

The impact strength results of the UHMWPE/ Al_2O_3 B-grade composites are summarized in **Table 5**. The experimental data reveal a gradual decrease in impact strength with increasing Al_2O_3 content in the composite system. The impact strength decreased

from 570.54 J/m for the composite containing 5 wt% Al_2O_3 to 415.34 J/m for the composite containing 25 wt% Al_2O_3 . This reduction indicates that the addition of ceramic particles tends to reduce the ability of the material to absorb impact energy before fracture.

The observed decrease in impact strength can be attributed to the intrinsic brittleness and high stiffness of Al_2O_3 particles. When rigid ceramic particles are incorporated into the UHMWPE matrix, they act as stress concentration sites during dynamic loading. Under impact conditions, these particles restrict the plastic deformation of the polymer matrix and reduce the ability of molecular chains to undergo large-scale slippage and energy dissipation. As a result, the composite becomes less capable of absorbing impact energy compared with the neat or low-filler UHMWPE system. Another factor contributing to the reduction in impact strength is the formation of particle agglomerates at higher filler contents. As the Al_2O_3 content increases, particle–particle interactions promote clustering. These agglomerates act as microstructural defects that facilitate crack initiation and propagation under sudden loading. Consequently, cracks propagate more readily through the composite, resulting in premature fracture and reduced impact resistance. Despite the reduction in impact strength, the addition of Al_2O_3 particles still provides beneficial improvements in other mechanical properties such as hardness, stiffness, and tensile strength, as observed in the previous sections. This

Table 5 Impact Strength of UHMWPE / Al_2O_3 Composites

Composition	Impact Strength (J/m)
UHMWPE 95%+ Al_2O_3	570.54 [17]
B-grade 5%	
UHMWPE 92%+ Al_2O_3	532.36 [17]
B-grade 8%	
UHMWPE 90%+ Al_2O_3	482.26 [17]
B-grade 10%	
UHMWPE 88%+ Al_2O_3	475.5
B-grade 12%	
UHMWPE 85%+ Al_2O_3	450.56
B-grade 15%	
UHMWPE 80%+ Al_2O_3 B-grade 20%	435.08
UHMWPE 75%+ Al_2O_3	415.34
B-grade 25%	

behavior is commonly reported in polymer–ceramic composites, where the incorporation of rigid fillers enhances stiffness and surface resistance but simultaneously reduces ductility and toughness. Therefore, the mechanical performance of UHMWPE/ Al_2O_3 composites represents a balance between improved stiffness and reduced impact toughness.

4. Discussion

The present study systematically investigated the influence of micron-sized B-grade Al_2O_3 particles on the mechanical, thermal, chemical, and microstructural properties of UHMWPE composites fabricated by hot compression molding. The results show that adding Al_2O_3 improves stiffness, breaking strength, hardness, and thermal conductivity, while reducing elongation at

break and impact strength. These changes are mainly related to the rigidity of ceramic particles, particle dispersion quality, and stress transfer efficiency at the interface. The findings confirm that reinforcement is primarily governed by physical interactions rather than chemical modification.

Tensile results indicate that increasing Al_2O_3 content enhances both breaking strength and elastic modulus. The ceramic particles act as load-bearing reinforcements due to their higher stiffness compared to the polymer matrix. When well dispersed, stress is efficiently transferred from UHMWPE to Al_2O_3 , improving resistance to deformation. These findings are consistent with previous work [17], which reported similar improvements using the same fabrication method. The present study extends earlier findings by examining a wider filler range (0–25 wt.%) and including thermal and microstructural analyses.

The results also agree with Latief et al. [9], who showed that uniform particle dispersion improves tensile properties through effective stress transfer. In this study, moderate Al_2O_3 contents led to continuous improvements, while higher contents resulted in reduced efficiency due to particle agglomeration. These agglomerates decrease interfacial area and act as stress concentrators, promoting localized deformation.

Hardness results further support the reinforcing effect of Al_2O_3 . Due to its high hardness, the addition of ceramic particles increases resistance to surface indentation.

The observed increase in Shore D hardness aligns with previous findings [17] and studies by Latief et al. [9] and Radhakrishnan et al. [4], which reported similar improvements. Despite differences in matrix materials, the mechanism remains consistent: ceramic particles restrict localized deformation and enhance load-bearing capacity.

In contrast, impact strength decreases with increasing Al_2O_3 content. This reflects a common trade-off in particle-reinforced composites. The rigid particles limit polymer chain mobility, reducing the material's ability to absorb impact energy through plastic deformation. As a result, cracks initiate and propagate more easily. Similar trends were reported in previous studies [17] and by Radhakrishnan et al. [4], confirming that increased stiffness often leads to reduced toughness.

FTIR analysis shows no new peaks or shifts, indicating that no chemical bonding occurs between UHMWPE and Al_2O_3 . The polymer structure remains unchanged, confirming that reinforcement arises from physical interactions. This agrees with previous findings [17], where similar behavior was observed.

SEM analysis provides direct evidence of these mechanisms. At low to moderate filler contents, particles are uniformly distributed, promoting effective stress transfer and improved mechanical properties. At higher contents, particle agglomeration becomes evident, creating stress concentration sites that facilitate crack initiation. These observations are consistent with Latief et al. [9] and Radhakrishnan et al. [4], emphasizing the

importance of dispersion quality. Combined SEM and FTIR results confirm that reinforcement is achieved through mechanical interlocking and efficient stress transfer. However, excessive agglomeration reduces effectiveness, as clustered particles act as defects rather than reinforcements.

Thermal conductivity improvements are attributed to the formation of conductive pathways through Al_2O_3 particles. Increasing filler content enhances heat transfer, although excessive clustering may disrupt these pathways and reduce performance.

Overall, micron-sized Al_2O_3 particles improved the mechanical performance of UHMWPE composites when uniformly dispersed. The reinforcement mechanism was primarily governed by physical interactions, efficient stress transfer, and restricted polymer chain mobility. These findings are consistent with previous studies [4], [9], and [17].

5. Conclusion

This study investigated the effects of micron-sized B-grade Al_2O_3 particles on the mechanical, thermal, and microstructural properties of UHMWPE composites fabricated by hot compression molding. The results showed that increasing Al_2O_3 content improved breaking strength, elastic modulus, hardness, and thermal conductivity, while elongation at break and impact strength gradually decreased. These trends indicate that ceramic reinforcement enhances the stiffness and thermal performance of UHMWPE but reduces its ductility and

energy absorption capability. SEM observations revealed that the reinforcing efficiency depended strongly on particle dispersion. Uniformly dispersed Al_2O_3 particles promoted effective stress transfer within the matrix, whereas particle agglomeration at higher filler contents acted as stress concentration sites and reduced the effectiveness of reinforcement. FTIR analysis showed no evidence of new chemical bond formation between UHMWPE and Al_2O_3 , suggesting that the improved composite performance originated primarily from physical reinforcement and mechanical load transfer rather than chemical interaction.

Overall, the results demonstrate that the mechanical and thermal performance of UHMWPE composites can be tailored by controlling the Al_2O_3 content and particle distribution. These findings provide useful information for the design of UHMWPE-based composites requiring improved stiffness, hardness, and thermal conductivity while maintaining balanced mechanical performance. Future work should focus on improving particle dispersion and interfacial adhesion through surface modification of Al_2O_3 , together with investigations of tribological behavior, fatigue performance, and long-term durability under practical service conditions.

6. Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge Rajamangala University of Technology Phra Nakhon for their technical assistance in material analysis, mechanical property

testing, and component fabrication, which were essential to the successful completion of this study.

7. References

- [1] Y. Xiao, L. Zhang, B. Wei, C. Lu, and L. Li, "Organic–inorganic core–shell materials as reinforced fillers of UHMWPE to improve its tribological and mechanical properties," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 691, pp. 133820, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.colsurfa.2024.133820.
- [2] P. Gangwani, N. Emami, and M. Kalin, "Tribological behaviour of nano-titanium dioxide filled UHMWPE composites with a variety of micro fillers based on carbon, boron nitride and silicon dioxide under water-lubricated condition," *Tribology International*, vol. 204, p. 110479, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.triboint.2024.110479.
- [3] A. A. Okhlopko, S. N. Danilova, A. A. Dyakonov, A. P. Vasilev, A. N. Ivanov, and S. A. Sleptsova, "Polymer Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1060, no. 1, pp. 012012, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012012.
- [4] G. Radhakrishnan, et al., "Effect of Alumina Microparticle-Infused Polymer Matrix on Mechanical Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite," *Journal of Composites Science*, vol. 9, no. 7, pp. 360, Jul. 2025, doi: 10.3390/jcs9070360.
- [5] D. Duraccio, V. Strongone, G. Malucelli, et al., "The role of alumina-zirconia loading on the mechanical and biological properties of UHMWPE for biomedical applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 164, pp. 800–808, May 2019, doi : 10.1016/j.compositesb.2019.01.097
- [6] R. Bensaada, A. El Malki Alaoui, G. Darut, et al., "Towards hybridization of ultra-high molecular weight polyethylene composites by thermally sprayed alumina: Feasibility and bond strength assessment," *Materials & Design*, vol. 227, pp. 111779, Mar. 2023, doi : 10.1016/j.matdes.2023.111779.
- [7] A. S. Mohammed, "UHMWPE nanocomposite coatings reinforced with alumina (Al_2O_3) nanoparticles for tribological applications," *Coatings*, vol. 8, no. 8, 280, Aug. 2018, doi : 10.3390/coatings8080280
- [8] L.-C. Alil, M. Arrigoni, C. Barbu, G. Bles, L. Deleanu, P. Mostovykh, and S. M. Sandu, "Mechanical Properties of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene (Tensylon®) from Tensile Tests," *Materiale Plastice*, vol. 59, no. 1, pp. 51–69, 2022, doi: 10.37358/MP.22.1.5559.
- [9] F. H. Latief, A. Chafidz, H. Junaedi, A. Alfozan, and R. Khan, "Effect of Alumina Contents on the Physicomechanical Properties of Alumina (Al_2O_3) Reinforced Polyester Composites," *Advances in Polymer*

- Technology*, vol. 2019, p. 5173537, Feb. 2019, doi: 10.1155/2019/5173537.
- [10] M. Di Maro, D. Duraccio, G. Malucelli, and M. G. Faga, "High density polyethylene composites containing alumina-toughened zirconia particles: Mechanical and tribological behavior," *Composites Part B: Engineering*, vol. 217, p. 108892, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108892.
- [11] M. Hussain, et al., "Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review," *Polymers*, vol. 12, no. 2, p. 323, Feb. 2020, doi : 10.3390/polym12020323.
- [12] Lei Li, et al. "Current Research Status of High-Performance UHMWPE Fiber: A review," *Materials Technology Reports*," vol. 2, no. 2, p. 1518, Dec. 2024, doi : 10.59400/mtr.v2i2.1518.
- [13] O. Hussain, B. Ahmad, and S. Saleem, "Tribological Performance of Biomedical Grade UHMWPE/Nano-Al₂O₃/Vitamin-C Hybrid Composite for Cartilage Replacements," *Materials Letters*, vol. 291, p. 129515, May 2021, doi : 10.1016/j.matlet.2021.129515.
- [14] B. F. D. A. F. Cardoso et al., "Thermal analysis, flexural mechanical properties and FTIR analysis of an HDPE matrix composite reinforced with alumina and silicon carbide," *OLEL*, vol. 22, no. 10, p. e7061, Oct. 2024, doi: 10.55905/oelv22n10-057.
- [15] Y. Liu et al., "Synergistic Enhancement of the Friction and Wear Performance for UHMWPE Composites under Different Aging Times," *Polymers*, vol. 16, no. 14, p. 2059, Jul. 2024, doi : 10.3390/polym16142059.
- [16] Y. Li et al., "Bio-Inspired Design and Optimization of 3D-Printed Al₂O₃/UHMWPE Composite Armor for Enhanced Penetration Resistance," *AIP Advances*, vol. 15, May 2025, doi : 10.1063/5.0262372.
- [17] N. Chalo and P. Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al₂O₃ for Application in Engineering", *RMUTP Research Journal Sciences and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 192–202, Jun. 2022.
- [18] G.-M. Huang et al., "Intrinsic thermal conductive ultra-high molecular weight polyethylene via cyclic pulsating pressure," *Polymer*, vol. 328, p. 128449, May 2025, doi: 10.1016/j.polymer.2025.128449.



RNU TP

RESEARCH JOURNAL

Sciences and Technology

E-ISSN : 3027-8260

