



Journal of Applied Research on Science and Technology

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Volume 21 Issue 1 January-June 2022

ISSN Online: 2773-9473
Print: 2773-9376

ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2565)

JARST



250°C



วัตถุประสงค์

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) เป็นวารสารที่เผยแพร่องค์ความรู้และประสบการณ์ทางด้านวิชาการและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดหมายและวัตถุประสงค์ของวารสารวิจัยดังนี้

1. เพื่อเผยแพร่แนวความคิด งานวิจัย การพัฒนาและประเด็นสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อกระตุ้นให้เกิดการอภิปรายทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขาวิชา ซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์

ทั้งนี้วารสารวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีอยู่ในฐานข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) โดยผ่านการรับรองคุณภาพจาก TCI และจะมุ่งเน้นพัฒนาคุณภาพเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูลสากลต่อไป

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สมหมาย	ผิวสอาด	อธิการบดี
รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์พิชญ์	ถ้วนภูษา	รองอธิการบดี
Prof. Sean	Danaher	Northumbria University (UK)
Prof. Hee Young	Lee	Yeungnam University (Korea)
Prof. Seiichi	Kawahara	Nagaoka University of Technology (Japan)

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรุณี	อริยวิริยะนันท์	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
-------------------------	-----------------	--------------------------------

กองบรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ตรีทศ	เหล่าศิริหงส์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์พิเชษฐ	ลัมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์คมสัน	มาลีสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์สนอง	เอกสิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกษียรพรอนงค์	อร่ามวิทย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ชูกิจ	ลิมปิจำนงค์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ศาสตราจารย์วสกร	บัลลังก์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์บุญยัง	ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์จตุรงค์	ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์สรพงษ์	ภาสุปรีย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์อมร	ไชยสัตย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นริศร์	บาลทิพย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 0 2549 4492 โทรสาร 0 2577 5038 และ 0 2549 4680
Website: <http://www.ird.rmutt.ac.th>

คณะผู้จัดทำ

นางสาวกชกร	ดาราพาณิชย์	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวฉัตรวดี	สายใยทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวณัฐวรรณ	ธรรมวัชรกร	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวมนต์ทิชา	รัตนพันธ์	สถาบันวิจัยและพัฒนา

คำนำ

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) เป็นวารสารที่ส่งเสริมงานด้านวิจัยและดำเนินงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index, TCI Centre) รับผิดชอบบทความวิจัย บทความวิชาการ เปิดรับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและวิชาการ รวมถึงแนวคิดในการพัฒนางานวิจัย เพื่อกระตุ้นให้เกิดเป็นแนวทางการอภิปรายทุกสาขาทั้งงานวิจัยพื้นฐาน และวิจัยประยุกต์จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

สำหรับวารสารวิจัยปีที่ 21 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มิถุนายน 2565) ได้รวบรวมผลงานทางวิชาการจากผลการวิจัยทั้งสิ้น จำนวน 12 บทความ ประกอบด้วยบทความจากผลงานวิจัยจากหลากหลายสาขา ซึ่งได้ผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งภายนอกและภายในมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกบทความจะเป็นประโยชน์และสามารถช่วยพัฒนางานวิจัยแก่ผู้ที่สนใจให้ก้าวหน้าต่อไปได้

กองบรรณาธิการ

สารบัญ

การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อด้วยต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ	1
A Study of the Filtration Efficiency of the N95 Medical Mask After Sterilization with the Developed Automatic Coronavirus Sterilizer	
อภิชาติ สังข์ทอง, ชัยวัฒน์ สมเงิน, วิฑิตนันท์ บุญศรี, บรรบต แซ่โค้ว และ ศุภนิจ พรธีระภัทร มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์	
การปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษจากเยื่อกล้วยด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	11
The Improvement of Paper Properties from Banana Pulp with Carboxymethyl Cellulose	
อัศเรศ ทองสว่าง และ กานต์พิชชา สุวรรณวัฒน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	
Low Density Polyethylene/Organoclay Nanocomposites Manufactured Using Oxidized Polyethylene as a Coupling Agent and the Flame Retardant Additive	22
Haydar U. Zaman and Ruhul A. Khan Bangladesh Atomic Energy Commission	
Solar Ultraviolet Radiation for Psoriasis Treatment at Nakhon Pathom Province	34
Sumaman Buntoung, Somjet Pattarapanitchai, Pradthana Laiwarin, Einapak Boontaveeyuwat and Serm Janjai Silpakorn University	
การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศ: กรณีศึกษาพลังงานทางเลือกก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรี	44
Comparison of Methods for Analysis of the Air Quality: A Case Study of Alternative Energy for Biogas in Suphanburi Province	
พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุพรรณภูมิ	
Efficient Modified Estimator for the Mean Estimation Using Auxiliary Information in Sample Surveys	55
Napattchan Dansawad King Mongkut's University of Technology Thonburi	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมักหน่อไม้ด้วยกล้าเชื้อโพรไบโอติก	65
Development of Fermented Bamboo Shoots with Probiotic Starter Culture	
ปาลิตา ตั้งอนุรัตน์ และ เจริญ เจริญชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	

สารบัญ (ต่อ)

แนวทางการพัฒนาผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา	74
Development Approach of Marinade Powder from <i>Suaeda maritima</i> for Fish	
สายชล ทองคำ, นภาพันธ์ โชคอำนวนัยพร และ ตติณณภพ จุ่มอิน	
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม	
การทอรีรีแฟกชันเหง้ามันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง	88
Torrefaction of Cassava Rhizome to Produce High-Grade Solid Biofuels	
จารุณี เข้มพิลลา และ ภูมินทร์ คงโต	
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม	
การขดของเชือกบนพื้นราบหมุน	103
Rope Coiling on a Rotating Plane	
สิรภาพ เงินงาม และ มาริสา เย็นตรัส	
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	
การเตรียมนีโอโซมสารสกัดจากเฒ่าสำหรับผลิตภัณฑ์บำรุงผิว	112
Preparation of Mao (<i>Antidesma thwaitesianum</i> Muell.Arg) Extract Niosomes for Skin Care Product	
สุภาภาณูจน์ พรหมจันทร์, ชนิษฐา วงศ์บาสก์ และ ศุภฤชชญา เหมะธูลิน	
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	
Screening for Rice Blast Resistant Genes, <i>Pi9</i>, <i>Pita</i>, <i>Pigm(t)</i> and <i>Pi54</i> in Landrace Rice Varieties of Northeastern Thailand	122
Chinanat Krainart, Ratiros Siang sai, Apinya Longya, Sitipun Sinumporn and Sucheela Talumphai	
Roi Et Rajabhat University	



การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อด้วยต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ

A Study of the Filtration Efficiency of the N95 Medical Mask After Sterilization with the Developed Automatic Coronavirus Sterilizer

อภิชาติ สังข์ทอง^{1*} ชัยวัฒน์ สมเงิน² ฐิตินันท์ บุญศรี² บรรบต แซ่ไคว² และ ศุภนิจ พรธีระภัก²

Apichart Sungthong^{1*}, Chaiwat Somgern², Thitinun Boonsee², Bunpot Saekow²

and Supanit Porntheeraphat²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

²ทีมวิจัยเทคโนโลยีเกษตรดิจิทัล (DAT) ด้านวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบและเครือข่ายอัจฉริยะ (ITSN) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

¹Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Chaserngsao 24000, THAILAND

²Digital Agriculture Technology Research Team (DAT), Deputy Executive Director Research and Development Intelligent Systems and Networks (ITSN), National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), THAILAND

*Corresponding author e-mail: sttchart@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: June 22, 2021

Revised: December 3, 2021

Accepted: March 8, 2022

Available online: May 9, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.1

Keywords: UV-C sterilizer, reusable mask, ultraviolet, disinfection

This research aims to develop an automatic coronavirus sterilizer. A research team which knowledge and experience in the branch of photonics technology for medical, together with a research team of virology jointly research to solve the aforementioned problems. Therefore, the system is designed as automatically sterilization process that is UV-C exposure, hot air dryer, packaging and sealing for the personal individual masks. We have found that the UV-C dose that can kill the amount of 200 microliters of coronavirus PEDV (more than the number of possible natural contamination) on N95 medical mask (model VFLEX 9105) within 1 minute and can kill the same amount of coronavirus faster

than 1 minute for higher UV-C intensity. The filtering efficiency of the medical masks which were through our sterilization machine have been sent to tested. It was found that the control mask and used mask that sterilized for 10- and 30-times cycles had no significant different filtration efficiency. This demonstrates that our automated coronavirus sterilizer prototype is not destroyed the filtration efficiency of the tested medical mask so this prototype is many advantages for killing the coronavirus may be on used medical masks and can be reused many times.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา โดยใช้ออกซ์คความรุ้ ประสพการณ์ในการทำงานด้านแสงเพื่อการใช้งานทางการแพทย์ร่วมกับทีมวิจัยผู้เชี่ยวชาญทางด้านไวรัสวิทยา ออกแบบให้เป็นระบบที่ใช้งานในการฆ่าเชื้อหน้ากากเฉพาะบุคคลและมีระบบปิดถูงเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อแล้วแบบอัตโนมัติจากการทดลอง ปริมาณและเวลาฆ่าเชื้อ (DOSE) ของแสงอัลตราไวโอเลต (UV-C) ที่มีผลในการทำลายเชื้อไวรัสโคโรนา Porcine Epidemic Diarrhea virus (PEDV) ที่ปนเปื้อนบนหน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M ที่นำมาทดสอบหาปริมาณของแสงยูวีซี ในการฆ่าเชื้อไวรัส พบว่าแสงยูวีซี ที่มีค่าความเข้มแสง $70 \text{ microwatt-sec/cm}^2$ สามารถทำลายเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV จำนวน 200 microliters (ซึ่งมากกว่าจำนวนที่เป็นไปได้ในการปนเปื้อนตามธรรมชาติ) ได้ในเวลา 1 นาที และสามารถทำลายเชื้อไวรัสโคโรนาได้เร็วกว่า 1 นาที ที่ความเข้มแสงมากขึ้นจากค่าปริมาณแสง ที่ได้ จึงได้นำมาพัฒนาสร้างต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ และจากผลทดสอบหาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ที่นำมาทดสอบ พบว่า หน้ากากที่ผ่านการฆ่าเชื้อจากเครื่องต้นแบบ จำนวน 10 และ 30 ครั้ง มีประสิทธิภาพการกรองที่เปลี่ยนแปลงไปจากหน้ากากที่

ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องต้นแบบน้อยมาก ๆ แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ จึงเหมาะสำหรับใช้ในการฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาที่อาจปนเปื้อนบนหน้ากากทางการแพทย์ และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง

คำสำคัญ: เครื่องฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวีซี หน้ากากแบบใช้ซ้ำได้ อัลตราไวโอเลต การฆ่าเชื้อโรค

บทนำ

จากสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ COVID-19 ซึ่งระบาดอยู่ในประเทศไทยและทั่วโลกในขณะนี้ [1-4] ทำให้บุคลากรทางการแพทย์มีหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ไม่เพียงพอ ราคาสูงขึ้นมาและเกิดภาวะขาดแคลน โดยเฉพาะหน้ากากชนิด N95 ที่บุคลากรทางการแพทย์ผู้เกี่ยวข้องต้องใช้ต่อวันเป็นจำนวนมากหลายชิ้นต่อคน ทำให้ต้องมีการนำมาใช้ซ้ำ ปัจจุบันการฆ่าเชื้อมีหลากหลายเครื่องมือ หลายวิธี [6-7] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ภาวะการระบาดระดับโลกเช่นนี้ ทำให้มีเครื่องมือ อุปกรณ์ ออกมาจำหน่ายมากมาย มีการโฆษณาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อไวรัสโคโรนา อย่างไรก็ตามยังไม่เห็นผลการทดลองในการฆ่าเชื้อไวรัสสายพันธุ์โคโรนา

ประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อซ้ำ ๆ (ใช้ซ้ำ) ของเครื่องมือใดที่ออกมาอย่างชัดเจน

ทีมวิจัยจึงได้คิดค้นระบบฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาสำหรับหน้ากากทางการแพทย์ N95 แบบอัตโนมัติขึ้นเพื่อประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคและสามารถนำมาฆ่าเชื้อซ้ำหลังการใช้งานโดยไม่เสื่อมประสิทธิภาพ โดยอาศัยหลักการที่ใช้งานหน้ากาก N95 เคลื่อนที่ด้วยระบบรางเลื่อน ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีซี ผ่านระบบอบลมร้อน (Hot Air Oven) และปิดผนึกขึ้นต่อชิ้น (Individual Seal Pack) โดยออกแบบให้เป็นระบบที่ใช้งานในการฆ่าเชื้อหน้ากากเฉพาะบุคคล (Individual Personal-Mask Sterilizer with Auto Sealed Packing) ในขั้นตอนการพัฒนา มีการตรวจวัดแสงยูวีซี และการทดสอบฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาบนหน้ากากทางการแพทย์ N95 เพื่อหาปริมาณแสง ที่ถูกต้อง แม่นยำ ตลอดจนการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อซ้ำ ด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้น จำนวนมากถึง 30 ครั้ง

วิธีดำเนินการวิจัย

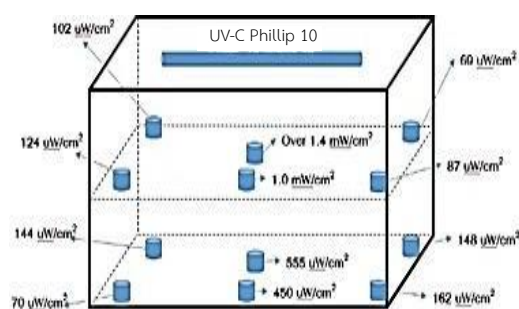
1. การศึกษาและหาปริมาณ ของแสงยูวีซี ที่มีผลต่อไวรัสโคโรนาบนหน้ากากทางการแพทย์ N95

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

- ตู้และหลอด UV-C Phillip 10 Watt
- เครื่อง UV-C Power Meter
- หน้ากากทางการแพทย์ N95 ของบริษัท 3M
- เชื้อไวรัสโคโรนา PEDV ในการทดลอง (Non Pathogenic in Human)
- Auto Cell Culture Machine
- One Step RT-PCR KIT

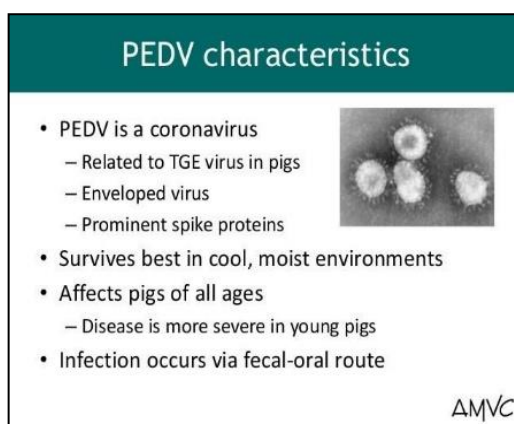
สำหรับการจัดวางหลอดยูวีซี และวัด UV-C Output วัดค่าความเข้มแสงยูวีซี ที่ตำแหน่งวางชิ้นงาน

ภายในตู้ ทั้งด้านบนและด้านล่าง ได้ค่าความเข้มแสงแสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ค่า UV-C Output ที่ระยะวางชิ้นงาน

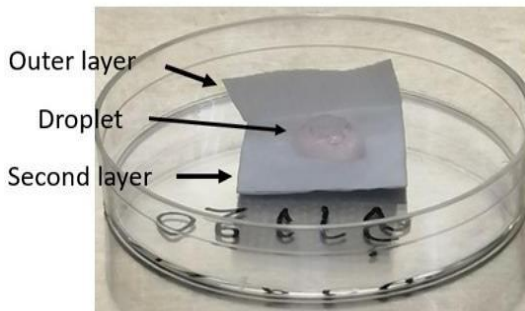
การทดลองประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อบนตัวอย่างหน้ากาก N95 จากห้องปฏิบัติการไวรัสวิทยา ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ โดยทำการทดลองด้วยเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV (Non Pathogenic in Human) ซึ่งเป็นไวรัสโคโรนาที่มีขนาดใกล้เคียงกับ COVID-19 และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลที่สามารถใช้เป็นตัวแทนการทดสอบ มีสมบัติแสดงดังรูปที่ 2



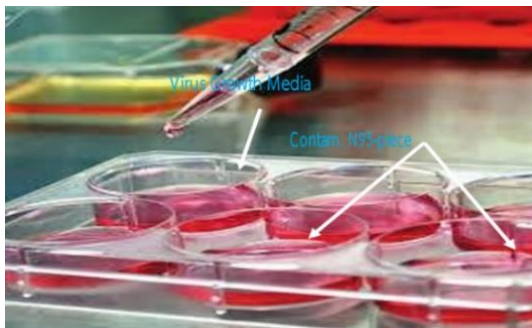
รูปที่ 2 สมบัติเฉพาะของเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV ที่ใช้ทดสอบ

จากนั้นตัดหน้ากาก N95 ออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และเตรียมชิ้นงานหยดเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV ด้วยการหยดเชื้อ PEDV จำนวน 200 microliters และนำไปวางในตำแหน่งความเข้มแสงยูวีซีต่าง ๆ ลักษณะชิ้นหน้ากาก

N95 ที่ได้รับการหยดเชื้อ แสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นรอเวลาให้เชื้อซึมเข้าในเนื้อหน้ากากจนหมด และเตรียมชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ปนเปื้อนเชื้อไวรัสโคโรนา และได้รับการฉายแสงยูวีซี ตามตำแหน่งและเวลาต่าง ๆ ไปทำ Viral RNA Extraction ใน Well plate ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะชิ้นส่วนหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ได้รับการหยดเชื้อ PEDV จำนวน 200 microliters



รูปที่ 4 ชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ปนเปื้อนไวรัสโคโรนา PEDV ทั้งที่โดนฉายแสงยูวีซี จำนวน 8 Wells และไม่โดนฉายแสง (ควบคุม) จำนวน 1 Well

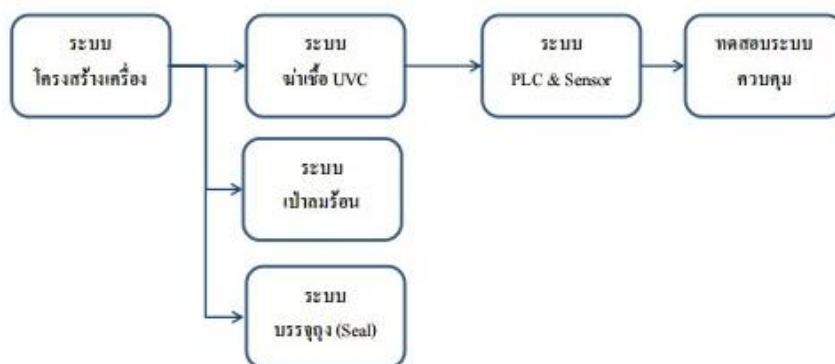
งานวิจัยนี้ได้ใช้ One Step RT-PCR KIT (Takara Bio.) ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับตรวจสอบโครงสร้าง RNA ของไวรัส จากตัวอย่างชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่เตรียมไว้ ผลของ RT-PCR จากชิ้นส่วน N95 ที่ความเข้มแสงและเวลาต่าง ๆ กับเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV (ควบคุม) ที่ไม่โดนฉายแสง พบแถบ RNA ของไวรัส บน Electrophoresis Gel ทุก ๆ ความเข้มแสง

และเวลาต่าง ๆ และจะเห็นได้ว่า แถบ RNA ของไวรัสที่โดนฉายแสงยูวีซี ส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปจากแถบ RNA ของไวรัส ที่ไม่โดนฉายแสง (ควบคุม) แสดงให้เห็นถึงว่า ความยาวคลื่นแสงยูวีซี (254 nm) ความเข้มแสง และเวลาในการฉายแสง ที่ตำแหน่งชิ้นงานที่ปนเปื้อนไวรัส เป็นตัวแปรที่มีผลในการทำลายถึงระดับ RNA ของไวรัส ได้



รูปที่ 5 Real-Time PCR Kit

การพัฒนานวัตกรรมเครื่องฆ่าเชื้อหน้ากากทางการแพทย์ N95 แบบอัตโนมัติ ถูกรออกแบบให้มีการผสมผสานกับระบบลำเลียง Automation ในระบบงานอุตสาหกรรม เข้ากันกับเทคโนโลยีไร้สายโดยใช้ระบบ PLC & Sensor ควบคุมการทำงานของเครื่องใช้หลักการฆ่าเชื้อด้วย UV-C Germicidal Lamp ให้ความยาวคลื่น 254 nm คำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานโดยไม่มีแสงยูวีซี เล็ดลอดออกมาภายนอก มีช่องมองการทำงานของหลอดโดยใช้วัสดุใสที่สามารถกันแสงยูวีซี ได้ทั้งหมด ภายในส่วนของการฉายแสง ใช้วัสดุ Anodized Aluminium ทำให้เกิดการกระจายแสงได้ดี โดยขั้นตอนหลัก ๆ ในการสร้างเครื่องฆ่าเชื้อมีดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนหลัก ๆ ในการสร้างเครื่องฆ่าเชื้อหน้ากากทางการแพทย์ N95 แบบอัตโนมัติ

หลักการฆ่าเชื้อด้วย UV-C Germicidal Lamp ที่ให้ความยาวคลื่น 254 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ DNA ดูดซับได้ดีที่สุด จึงทำให้เชื้อโรคไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย ไวรัส รา เส้นใย ยีสต์ เป็นต้น ถูกทำลาย โครงสร้างกรดนิวคลีอิกที่เป็นองค์ประกอบของ DNA และ RNA ของเชื้อโรค แต่ในแสงในบรรยากาศธรรมชาติจะไม่พบแสงยูวีซี เนื่องจากไม่สามารถผ่านชั้นโอโซนมายังผิวโลกได้ เครื่องต้นแบบจะใช้หลอดแสงยูวีซี ยี่ห้อ Phillips UVC 10W T5G13 ขนาด 30 เซนติเมตร จำนวน 2 หลอด ติดตั้งตำแหน่งด้านบน-ล่าง ของสายพานลำเลียงในส่วนฉายแสงฆ่าเชื้อทั้งด้านบนและด้านล่างของหน้ากาก 95 ที่เคลื่อนเข้ามา

2. การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อซ้ำ ๆ ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อซ้ำ ๆ ด้วยเครื่องฆ่าเชื้อที่พัฒนาขึ้นมา โดยหน้ากากที่นำมาใช้ทดสอบเป็นหน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M ซึ่งหน้ากากในรุ่นดังกล่าวเป็นรุ่นที่มีการใช้งานในห้องปฏิบัติการตรวจเชื้อในโรงพยาบาล การเตรียมตัวอย่างจะตัดชิ้นงานเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรตำแหน่งตามรูปที่ 7 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากตาม

มาตรฐาน ASTM F2299 โดยหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม (Research Unit of Applied Electric Field in Engineering (RUEE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องสร้างอนุภาค เครื่องแยกและคัดกรองอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน อนุภาคที่ได้จะไหลผ่านตัวอย่างเครื่องวัดอนุภาคทำการวัดจำนวนอนุภาคก่อนและหลังตัวอย่าง นำผลการวัดที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการกรอง ตามสมการที่ (1)



รูปที่ 7 ตัวอย่างหน้ากาก N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M และตำแหน่งการตัดชิ้นงานส่งทดสอบ

$$\eta = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \quad (1)$$

เมื่อ C_{inlet} คือ จำนวนอนุภาคก่อนผ่านแผ่นกรองอนุภาค

Coutlet คือ จำนวนอนุภาคหลังผ่านแผ่นกรองอนุภาค

ทำการทดสอบ 3 เงื่อนไข คือ หน้ากาก N95 ที่ผ่านเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ จำนวน 10 และ 30 ครั้ง และไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ (ควบคุม)

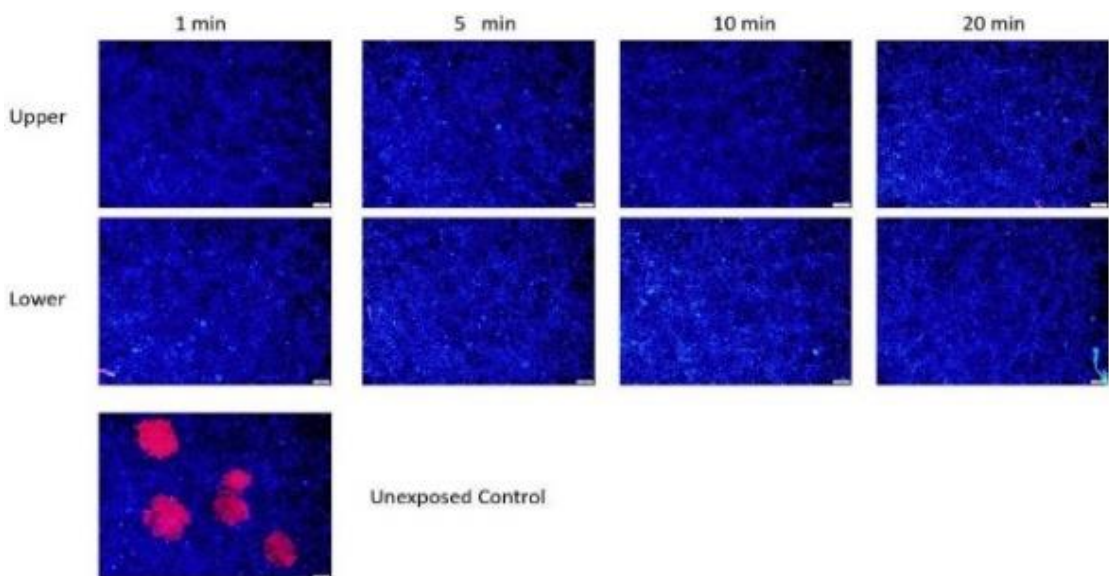
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. การศึกษาและหาปริมาณ ของแสงยูวีซี ที่มีผลต่อไวรัสโคโรนาบนหน้ากากทางการแพทย์ N95

เชื้อไวรัสโคโรนา PEDV (Non Pathogenic in Human) จำนวน 200 microliters ต่อชิ้นส่วนหน้ากาก N95 โดยหยดลงไปตรงชั้นกลางของหน้ากากเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อซึมเข้าไปในชิ้นส่วนของ

หน้ากาก ก่อนทำการฉายด้วยแสงยูวีซี แล้วนำชิ้นส่วนทั้งหมดไปทำ Viral RNA Extraction

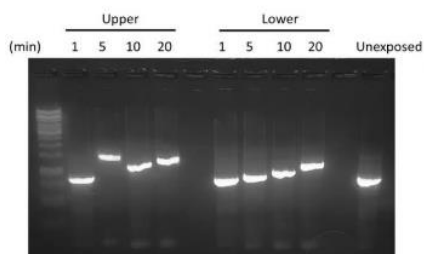
วิธีการ Cell Culture จะเป็นการแสดงถึงการดำรงอยู่ของไวรัสที่มีอยู่ในชิ้นส่วนของหน้ากาก N95 โดยที่หน้ากาก N95 ที่ถูกฉายด้วยความเข้มแสงและเวลาต่าง ๆ กัน จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มแสงประมาณ 70 microwatt-sec/cm² ขึ้นไป สามารถเข้าทำลายให้ไวรัสโคโรนาไม่สามารถเจริญเติบโตได้ นั่นหมายความว่า ไวรัสไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เมื่อโดนฉายแสงยูวีซี ที่ความเข้มนี้หรือมากกว่า ในเวลา 1 นาที เป็นต้นไป ในขณะที่ชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ควบคุม หรือชิ้นที่ไม่โดนฉายแสง (Unexposed Control) ยังพบการเจริญเติบโตของเชื้อไวรัสอยู่ (ก่อนผสมพูนีในรูปแบบที่ 8)



รูปที่ 8 ผลของวิธี Cell Culture จากชิ้นส่วนหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ความเข้มแสงและเวลาในการฉายแสง

จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์ RNA ด้วยเทคนิค Real-Time PCR (RT-PCR) จากผลของ RT-PCR ของชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ถูกหยดเชื้อไวรัสโคโรนาจำนวนเท่า ๆ กัน แต่ถูกฉายแสงที่ความเข้มและเวลาต่าง ๆ กัน พบว่าชิ้นส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง (Unexposed) ปรากฏแถบ RNA ของไวรัส PEDV บน Electrophoresis Gel และจะเห็นว่า ชิ้นส่วนหน้ากากที่ถูกฉายแสงยูวีซี ส่วนใหญ่

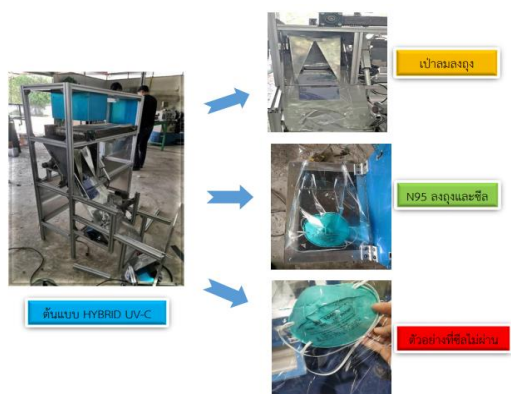
จะมีแถบ RNA เปลี่ยนไปจากแถบ RNA ของเชื้อไวรัส PEDV ที่ไม่ถูกฉายแสง (ควบคุม) นั้นแสดงให้เห็นว่าแสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 nm ความเข้มแสง และเวลาในการฉายแสง ณ ตำแหน่งผิวของชิ้นงาน เป็นตัวแปรที่มีผลในการทำลายไวรัสถึงระดับ RNA ได้ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลของ RT-PCR จากชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ความเข้มแสงและเวลาต่าง ๆ

2. การพัฒนาต้นแบบระบบฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนการปิดผนึก (Seal) และโครงสร้างเครื่องฆ่าเชื้อ แสดงในรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 ขั้นตอนการปิดผนึกและตัวอย่างการปิดผนึกถุงที่ตีและไม่ได้



รูปที่ 11 เครื่องต้นแบบระบบฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ

3. การทดสอบประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อซ้ำ ๆ ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

ได้ทำการทดสอบ 3 เงื่อนไข คือ หน้ากาก N95 ที่ผ่านเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ จำนวน 10 และ 30 ครั้ง และไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ (ควบคุม) โดยหน้ากากที่นำมาใช้ทดสอบเป็นหน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M โดยมีตัวแปรในการทดสอบหาประสิทธิภาพการกรอง ดังนี้คือ

Area Tested: 12.57 cm²

Particle Size: 0.3 μm

Total Flow Rate: 28.3 L/min

Delta P Flow Rate: 8 L/min

Face Velocity: 10.6 cm/s

Environment: 23°C, 47%RH

References: TSI AeroTrak Model 9310 S/N 93101821004

TSI Manometer Model 8380 S/N: T83801703012

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M ที่ยังไม่ผ่านต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ (ควบคุม) และผ่านการฆ่าเชื้อจำนวน 10 และ 30 ครั้ง ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดสอบ 5 ชิ้น ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

จากผลทดสอบหาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M ที่ยังไม่ผ่านต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ (ควบคุม) และผ่านการฆ่าเชื้อจำนวน 10 และ 30 ครั้ง ดังแสดงผลในตารางที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกรอง 96.74%, 96.65% และ 95.55% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกรองยังคงไม่ต่ำกว่ามาตรฐานคือ 95% ในแต่ละเงื่อนไขมีประสิทธิภาพการกรองที่

เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องกรองของหน้ากากทางการแพทย์ จึงสามารถใช้ในการฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นมาฆ่าเชื้อไวรัสสำหรับหน้ากากทางการแพทย์ที่ต้องการใช้ไม่ได้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพการซ้ำได้หลาย ๆ ครั้ง

ตารางที่ 1 ชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ (ควบคุม)

Test Article Number	Concentration Control Counts	Filtrate Counts	Filtration Efficiency
1	2,705,300	87,597	96.76%
2	2,615,866	80,707	96.91%
3	2,644,521	88,541	96.65%
4	2,683,324	88,421	96.70%
5	2,674,346	88,735	96.68%

Test Article Number	Delta P(mmH ₂ O)	Delta P(mmH ₂ O/cm ²)	Delta P(Pa/cm ²)
1	40.32	3.21	31.46
2	40.85	3.25	31.87
3	40.83	3.25	31.85
4	40.21	3.20	31.37
5	40.20	3.20	31.36

Average Filtration Efficiency: 96.74%

ตารางที่ 2 ชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ 10 ครั้ง

Test Article Number	Concentration Control Counts	Filtrate Counts	Filtration Efficiency
1	2,692,297	87,456	96.75%
2	2,592,933	96,325	96.29%
3	2,556,820	80,424	96.85%
4	2,605,689	80,671	96.90%
5	2,657,463	94,583	96.44%

Test Article Number	Delta P(mmH ₂ O)	Delta P(mmH ₂ O/cm ²)	Delta P(Pa/cm ²)
1	38.28	3.05	29.86
2	39.05	3.11	30.47
3	38.69	3.08	30.18
4	38.95	3.10	30.39
5	39.16	3.12	30.55

Average Filtration Efficiency: 96.65%

ตารางที่ 3 ชิ้นส่วนหน้ากาก N95 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ 30 ครั้ง

Test Article Number	Concentration Control Counts	Filtrate Counts	Filtration Efficiency
1	2,602,085	109,788	95.78%
2	2,556,537	116,290	95.45%
3	2,589,329	111,272	95.70%
4	2,567,431	125,436	95.11%
5	2,647,136	113,243	95.72%
Test Article Number	Delta P(mmH ₂ O)	Delta P(mmH ₂ O/cm ²)	Delta P(Pa/cm ²)
1	40.08	3.19	31.27
2	39.93	3.18	31.15
3	39.15	3.11	30.54
4	40.11	3.19	31.29
5	40.33	3.21	31.46

Average Filtration Efficiency: 95.55%

สรุปผล

จากการทดลองหาปริมาณ Dose ของแสงยูวีซี ที่มีผลในการทำลายเชื้อไวรัสโคโรนาที่ปนเปื้อนบน หน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของบริษัท 3M ที่นำมาทดสอบ พบว่าแสงยูวีซี ที่มีค่าความเข้มแสง 70 microwatt-sec/cm² สามารถทำลายเชื้อไวรัสโคโรนา PEDV จำนวน 200 microliters (ซึ่งมากกว่าจำนวนที่เป็นไปได้ในการปนเปื้อนตามธรรมชาติ) ได้ในเวลา 1 นาที และจะสามารถทำลายเชื้อไวรัสโคโรนาได้เร็วกว่า 1 นาที ที่ความเข้มแสงมากขึ้น จากผลของ Cell Culture ไม่พบไวรัส ที่ใส่ไปจำนวน 200 microliters ว่ามีการเจริญเติบโตหลังการฉายแสง นั้นหมายถึงไวรัสถูกฆ่าให้ตายไปแล้ว ในขณะที่พิสูจน์ด้วย RT-PCR พบว่ามีแถบ RNA ไวรัสบนชิ้นงานทดสอบ นั้นหมายถึงการที่เคยมีไวรัสอยู่บนชิ้นงานมาก่อนนั่นเอง

จากค่าปริมาณแสงที่ได้ จึงได้นำมาพัฒนา สร้างต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบอัตโนมัติ โดยใช้หลอดแสงยูวีซี ในการฆ่าเชื้อ ที่ตำแหน่งวางชิ้นงาน มีค่าความเข้มแสงยูวีซี มากกว่า 260 microwatt-sec/cm² ได้ออกแบบให้มีแสงยูวีซี มาจาก ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน เพื่อฆ่าเชื้อทั้งสองด้าน

ของชิ้นงานพร้อม ๆ กันโดยไม่ต้องทำการกลับพลิก ชิ้นงาน กำหนดตั้งเวลาในการฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาบน ชิ้นงานในเครื่อง ไว้เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อผู้ใช้งาน จากนั้นชิ้นงานที่ถูกฉายแสงยูวีซี แล้ว จะเลื่อนไปในส่วนของการเป่าลมร้อนเพื่อจุดประสงค์ในการไล่ความชื้นออกจากชิ้นงาน และเลื่อนไปบรรจุลงถุง และปิดปากถุงด้วยลวดความร้อน ชิ้นงานจะตกลงมาที่ช่องเก็บชิ้นงานด้านหน้าเครื่อง ทุกกระบวนการหลังจาก ผู้ใช้วางชิ้นงานเข้าเครื่อง เครื่องจะทำงานแบบอัตโนมัติ

จากผลทดสอบหาประสิทธิภาพการกรองของ หน้ากากทางการแพทย์ N95 รุ่น VFLEX 9105 ของ บริษัท 3M ที่นำมาทดสอบนั้น พบว่า หน้ากากที่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อจากต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา แบบอัตโนมัติและที่ผ่านการฆ่าเชื้อจากเครื่องต้นแบบ จำนวน 10 และ 30 ครั้ง มีประสิทธิภาพการกรองที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ไม่ผ่านเครื่อง) น้อยมาก ๆ แสดงให้เห็นว่าต้นแบบเครื่องฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนาแบบ อัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากทางการแพทย์ จึงเหมาะสำหรับการฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา

ที่อาจปนเปื้อนบนหน้ากากทางการแพทย์ และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลาย ๆ ครั้ง

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอขอบคุณ ดร. อนันต์ จงแก้ววัฒนา นักวิจัยอาวุโส จากทีมวิจัยนวัตกรรมสุขภาพสัตว์และการจัดการ (AVIG) ศูนย์เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรมแห่งชาติ (BIOTEC) สวทช. (NSTDA) สำหรับความช่วยเหลือทางด้านสายพันธุ์ของไวรัส การทดสอบและคำแนะนำเกี่ยวกับการทดสอบในครั้งนี้ ขอขอบคุณหน่วยงานให้ทุน TCELS ที่ได้สนับสนุนการให้ทุนในครั้งนี้จึงทำให้ งานวิจัยและผลงานนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) situation report -68 [Internet]. [cited 2020 Mar 28]. Availability from: <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/2020-0328-sitrep-68-covid-19.pdf>.
2. Del Rio C, Malani PN. COVID-19—New insights on a rapidly changing epidemic. JAMA. 2020;323(14):1339-40. doi:10.1001/jama.2020.3072.
3. World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public: when and how to use masks [Internet]. [cited 2020 Jun 15]. Availability from: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public/when-and-how-to-use-masks>.
4. Joob B, Wiwanitkit V. COVID-19 in medical personnel: observation from Thailand. J Hosp Infect. 2020;104(4):453. [https://doi:10.1016/j.jhin.2020.02.016](https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.02.016).
5. Moore G, Ali S, Cloutman-Green EA, Bradley CR, Wilkinson MAC, Hartley JC, et al. Use of UV-C radiation to disinfect non-critical patient care items: a laboratory assessment of the Nanoclave Cabinet. BMC Infect Dis. 2012;12:174. [https://doi:10.1186/1471-2334-12-174](https://doi.org/10.1186/1471-2334-12-174).
6. Beck SE, Hull NM, Poepping C, Linden KG. Wavelength-Dependent damage to adenoviral proteins across the germicidal UV spectrum. Environ Sci Technol. 2018;52(1):223-9. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04602>.
7. Woo H, Beck SE, Boczek LA, Carlson KM, Brinkman NE, Linden KG, et al. Efficacy of inactivation of human enteroviruses by dual-wavelength germicidal ultraviolet (UV-C) light emitting diodes (LEDs). Water (Basel). 2019;11(6):1131. <https://doi.org/10.3390/w11061131>.



การปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษจากเยือกกล้วยด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

The Improvement of Paper Properties from Banana Pulp with Carboxymethyl Cellulose

อัครเดช ทองสว่าง และ กานต์พิชชา สุวรรณวัฒน์เมธี*

Akaradet Tongswang and Kanpicha Suwannawatanamatee*

สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Department of Digital Printing & Packaging Technology, Faculty of Mass Communication Technology,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: August 11, 2021

Revised: December 17, 2021

Accepted: March 8, 2022

Available online: May 9, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.2

Keywords: handicraf paper,
paper properties,
carboxymethyl cellulose

This research aims to study the properties of paper which was made of banana pulp coated with carboxy methyl cellulose. The 12 percent concentration of sodium hydroxide (NaOH) per dried banana weight and 4 percent concentration of sodium sulfate (Na_2SO_4) per dried banana weight were used in the experiment. Then, it was boiled to break down the lignin for 90 minutes at the 100 degree Celsius temperature, formed paper sheets weighed 80 g/m^2 , and coated of carboxymethyl cellulose of 34 microns thick with bar coater. Three levels of concentration were 1, 2 and 3% (w/v) coated of one and two layers. After that, it was left for 24 hours at 25 degree Celsius temperature and 50 percent of humidity. This could test the mechanical properties of the paper water absorption properties, and printability properties. The research results showed that the coated paper of carboxymethyl cellulose had mechanical properties of increasing paper thickness resulted in the properties of bursting strength, tensile strength, and gloss increases. It affected the printability properties, an increasing density of paper to print and also

it can keep details of thin lines and small text size. The value of water absorption of paper properties was reduced. From the research result, the paper coated of carboxymethyl cellulose could be developed to other packaging and basic data of paper development for farmer or community organizations in the future.

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติกระดาษจากเยือกกล้วยที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส การทดลองใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 12% ต่อน้ำหนักกากกล้วยแห้ง และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้น 4% ต่อน้ำหนักกากกล้วยแห้ง ต้มเพื่อสลายลิกนินเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปแผ่นกระดาษน้ำหนัก 80 กรัม/ตารางเมตร และเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสด้วยบาร์โค้ดเตอร์ (Bar coater) ความหนา 34 ไมครอน เปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3% (w/v) โดยทำการเคลือบหนึ่งชั้นและสองชั้นหลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้น 50% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางด้านการพิมพ์ ผลการวิจัยพบว่า กระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติเชิงกลเรื่องความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงดึง ความมันเงาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังส่งผลต่อสมบัติทางด้านการพิมพ์มีความค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาษเพิ่มขึ้นและสามารถเก็บรายละเอียดของเส้นและตัวอักษรที่มีขนาดเล็กได้ ในส่วนของการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการวิจัยบ่งบอกถึงกระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสามารถนำไปต่อยอดในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับหีบห่อ และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้ในการพัฒนากระดาษให้กับองค์กร เกษตรกร หรือชุมชนในลำดับถัดไป

คำสำคัญ: กระดาษเชิงหัตถกรรม สมบัติกระดาษ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

บทนำ

กระดาษมีแนวโน้มการใช้มากยิ่งขึ้นเนื่องจากการเติบโตของการส่งสินค้าออนไลน์อันเป็นผลมาจากการเกิดโรคระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 มีการใช้ชีวิตแบบ New Normal จึงส่งผลให้เกิดการใช้กระดาษที่ใช้ในการผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์ที่มีจำนวนมากตามไปด้วย โดยผลิตภัณฑ์กระดาษ ไตรมาส 1 ปี 2564 มีมูลค่าการส่งออก 538.71 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.71 โดยประเทศที่เป็นคู่ค้าหลักได้แก่ประเทศจีน คิดเป็นร้อยละกว่า 80 [1] และการรณรงค์ในเรื่องของสิ่งแวดล้อมรวมทั้งกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพราะกระดาษเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ประเภทเดียว ที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้จากการปลูกป่าทดแทน สามารถพิมพ์ตกแต่งได้ง่ายและสวยงาม ทั้งสามารถเคลือบหรือประกบติดกับวัสดุชนิดอื่นได้ดี [2] อีกทั้งยังสามารถออกแบบหรือพิมพ์กราฟิกใส่ลงไปได้ง่าย นอกจากนี้ยังสะดวกต่อการขนส่งจากผู้ผลิตไปยังผู้ใช้เนื่องจากพับได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง กระดาษจึงนับได้ว่ามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ

การผลิตกระดาษเชิงหัตถกรรมจากวัตถุดิบในท้องถิ่นกำลังได้รับความสนใจจากชุมชนต่าง ๆ เนื่องจากการนำวัตถุดิบที่หาง่ายในท้องถิ่นมาเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เช่น เปลือกปอสา ใบสับปะรด ชานอ้อย ผักตบชวา ฟางข้าว ต้นกล้วย เป็นต้น โดยใช้วิธีการที่มีประสิทธิภาพ ไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อสร้างงานสร้างรายได้ให้กับคนในชุมชน สำหรับกระดาษเชิงหัตถกรรมที่รู้จักกันดีและซื้อขายกันที่แพร่หลายอยู่ในประเทศไทยก็คือกระดาษสาที่ทำมาจากเปลือกปอสา ซึ่งเป็นภูมิปัญญาที่เกิดจากภาคเหนือ ในยุคสมัยก่อนนิยมนำกระดาษสามาใช้ทำร่มกระดาษ และกระดาษว่าว ต่อมาเมื่อได้รับความนิยมจึงได้พัฒนาคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น เพื่อผลิตเป็นงานกระดาษทำมือ (Handmade) ซึ่งมีเสน่ห์และมีความเป็นเอกลักษณ์ในชิ้นงานจึงเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ส่วนในภาคกลางของประเทศไทยมีการปลูกกล้วยอยู่เป็นจำนวนมากมีต้นกล้วยที่เหลือทิ้งจากการเก็บผลผลิต

การผลิตกระดาษจากต้นกล้วยมีกระบวนการผลิตที่มีความเหมือนกับกระบวนการผลิตกระดาษเชิงหัตถกรรมโดยทั่วไป ด้วยการใช้อุปกรณ์ดัดและลอกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และก็ยังมีการย่อยสลายเยื่อด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งกระดาษจากต้นกล้วยที่ได้จากการผลิตดังกล่าวยังไม่มีหลากหลายและประสิทธิภาพมากพอจำเป็นจะต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเติมสารเติมแต่งหรือปรับปรุงคุณภาพในด้านอื่น ๆ นักวิจัยได้พยายามใช้สารเติมแต่งประเภทนาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทดแทนการใช้สารเติมแต่งประเภทน้ำมันปิโตรเลียม [3] หนึ่งในสารเคลือบที่นำมาใช้ในการเคลือบผิวกระดาษได้แก่คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส เป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีความสำคัญและใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ยา เครื่องสำอาง และสารทำความสะอาด เนื่องจากคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสช่วยเพิ่มความหนืด ไม่มีพิษ ไม่ก่อให้เกิดการแพ้ สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่าย และทางด้านอุตสาหกรรมกระดาษ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสยังเป็นสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้สำหรับเคลือบกระดาษ ช่วยเพิ่มแรงยึดระหว่างเส้นใย

ในการวิจัยจึงจะทำการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษจากเยื่อกล้วย โดยการใช้คาร์บอกซิเมทิล

เซลลูโลส เป็นสารเคลือบเพื่อให้กระดาษมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และพัฒนาเป็นแนวทางในการผลิตกระดาษจากเยื่อกล้วยให้มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการประยุกต์ใช้กระดาษดังกล่าวในการผลิตเป็นวัสดุตกแต่งเป็นบรรจุภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ใช้กระดาษเป็นหลัก รวมทั้งยังสามารถเป็นอาชีพทางเลือกให้กับบุคคลที่มีความสนใจ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุการทำวิจัย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) (Ajax Sigma – Aldrich, USA) ใช้เป็นสารดัดเพื่อละลายลิกนินในเยื่อกระดาษ, โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) (Sigma – Aldrich, USA) ใช้เป็นสารดัดเพื่อละลายลิกนินในเยื่อกระดาษ กาบนอกกล้วยแห้งที่มีขนาด 4-5 เซนติเมตร คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) (Carboxymethyl cellulose, Sigma – Aldrich, USA)

2. การเตรียมเยื่อกล้วยและสารเคลือบ

2.1 การเตรียมเยื่อกล้วย นำกาบนอกกล้วยน้ำว่าสดตัดให้มีขนาด 4-5 เซนติเมตร ปริมาณ 5 กิโลกรัม ตากให้แห้งด้วยแสงแดดกลางแจ้งหรืออบให้แห้งด้วยเครื่องอบ จนเหลือความชื้น 15-20% และต้มเพื่อละลายลิกนินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 12% (w/v) และโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ความเข้มข้น 4% (w/v) เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นล้างทำความสะอาดเยื่อและปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบใบพัดสี่แฉก (4-bladed stainless steel propeller homogenizer, Yellow line OST 20 digital, Germany) ความเร็วรอบ 700 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที เพื่อตัดให้เยื่อมีขนาดที่สั้นลง และทำการตีเยื่อด้วยเครื่องตีเยื่อแบบปั่นกระจายใช้อัตราส่วนของเยื่อน้ำคือ 1 ต่อ 10 ส่วนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เยื่อปริมาณ 2 กิโลกรัม คำนวณร้อยละของความเข้มข้นเยื่อ (%Pulp Consistency) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Total cons. (\%)} = \left(\frac{\text{dry weight of sample}}{\text{total weight of sample}} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดยเยือกกล้วยที่ได้มีความเข้มข้นเยื่อ (%Pulp Consistency) ร้อยละ 44.75 โดยน้ำหนัก

2.2 การเตรียมสารเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส โดยผสมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (w/v) [3] กับน้ำเปล่านำไปคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer IKA Yellow line MSH Basic, Germany) ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้น 50% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การขึ้นแผ่นกระดาษตัวอย่าง

ขึ้นแผ่นกระดาษตัวอย่างน้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยนำเยือกกล้วยปริมาณ 25 กรัมลงในบีกเกอร์เติมน้ำเปล่าปริมาณ 500 มิลลิลิตร ปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบใบพัดสี่แฉก (4-bladed stainless steel propeller homogenizer, Yellow line OST 20 digital, Germany) ความเร็วรอบ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที เทเยื่อลงในเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษที่มีขนาดตะแกรงกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ขนาดของรูตะแกรง 80 mesh ขนาดลวดตะแกรงเบอร์ 40 เปิดลมเป่าเพื่อไม่ให้เยื่อจับกลุ่มเป็นก้อนและกระจายได้ทั่วบริเวณ เป็นเวลา 5 นาที และทำการปล่อยน้ำออกจากเครื่องทันที จากนั้นนำไปตากแดดกลางแจ้งโดยวางตะแกรงทำมุม 15 องศา กับพื้นราบประมาณ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นลอกแผ่นกระดาษออกจากตะแกรงโดยการแกะบริเวณขอบกระดาษให้ครบทั้ง 4 ด้านและค่อย ๆ ดึงแผ่นกระดาษจากตะแกรงอย่างช้า ๆ นำแผ่นกระดาษที่ได้ทำการรีดด้วยความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที

4. การเคลือบผิวแผ่นกระดาษตัวอย่าง

นำแผ่นกระดาษตัวอย่างวางลงบนแท่นรองรับ จากนั้นตักสารเคลือบวางลงบนแผ่นกระดาษและทำการ

เคลือบด้วยบาร์โค้ดเตอร์ (Bar coater) เบอร์ 4 ความหนา 34 ไมครอน ปาดด้วยมือให้มีความหนาของการกดและความเร็วคงที่ ในกระบวนการเคลือบจะเคลือบกระดาษแค่ด้านเดียว โดยทำการเคลือบหนึ่งชั้นและสองชั้นทั้งความเข้มข้น 3 ระดับ (1, 2 และ 3% w/v) ในการเคลือบชั้นที่สองจะเคลือบหลังจากที่สารเคลือบชั้นแรกแห้งแล้ว และวางกระดาษตัวอย่างในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้น 50% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวางแผ่นเหล็กทับแผ่นกระดาษเพื่อป้องกันไม่ให้กระดาษเกิดการโค้งงอเมื่อกระดาษแห้งสนิท

5. การทดสอบสมบัติกระดาษ

5.1 น้ำหนักสารเคลือบบนแผ่นกระดาษ โดยการชั่งแผ่นกระดาษก่อนการเคลือบผิวและหลังการเคลือบผิวแล้วนำมาหาผลต่างของน้ำหนักได้จากรากสมการต่อไปนี้

$$(\text{Weight before test} - \text{Weight after test}) \quad (2)$$

5.2 ความหนาของแผ่นกระดาษ (มาตรฐาน Din 863-1 (1999)) ตัดตัวอย่างกระดาษอย่างละ 5 ชิ้น วัดความหนาของกระดาษแผ่นละ 5 ตำแหน่ง ด้วยเครื่องมือไมโครมิเตอร์ (Digital Outside Micrometer, Insize, Germany) หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5.3 ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) (มาตรฐาน ASTM D 774) เตรียมกระดาษทดสอบโดยตัดให้มีขนาด 80 x 80 มิลลิเมตร นำกระดาษเข้าเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (PAP2056, PAP, PAP-TECH Engineer & associates, India) ปรับแรงดันบนขึ้นทดสอบที่ถูกยึดแน่นโดยใช้แรงยึดที่เหมาะสม เพิ่มแรงดันที่เกิดจากระบบไฮดรอลิกผ่านแผ่นยางลงบนขึ้นทดสอบด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งขึ้นทดสอบขาด หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5.4 ความต้านทานแรงดึง (มาตรฐาน ASTM D 828) ตัดขึ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 25.5 มิลลิเมตร ยาว 254 มิลลิเมตร ยึดขึ้นทดสอบกับ

เครื่องทดสอบ (Tensile Testing, 3343U2900, Instron, USA) ด้วยปากจับทั้งสองด้าน โดยมีระยะห่างระหว่างปากจับของ 180 มิลลิเมตร ดึงด้วยอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของปากจับของ 25.4 มิลลิเมตรต่อนาที จนขึ้นทดสอบขาด จำนวน 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5.5 การดูดซึมน้ำ (Cobb Test) (มาตรฐาน Tappi T441) ตัดชิ้นทดสอบที่ไม่มีการพิมพ์ขนาด 140 x 140 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักกระดาษก่อนทดสอบแล้วนำไปประกอบกับ Cobb Sizing Tester (Gurley, 4180cn, USA) เหน้ 100 cm³ พร้อมจับเวลา 2 นาที เมื่อเหลือเวลา 15 วินาที ก่อนครบกำหนดให้เทน้ำออกพร้อมซับน้ำออกด้วยกระดาษซับ จำนวน 5 ซ้ำ และจึงชั่งน้ำหนักหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้ว

$(\text{Weight before test} - \text{Weight after test}) \times 100$ (3)

5.6 ความมันเงา (Gloss) นำแผ่นกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้น วัดค่าความมันเงา (Gloss, Multi Gloss MG-268A Gloss Meter, Konika Minolta, Japan) กำหนดองศาในการวัดที่ 75 องศา (มาตรฐาน Tappi T480 om-15 จำนวน 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

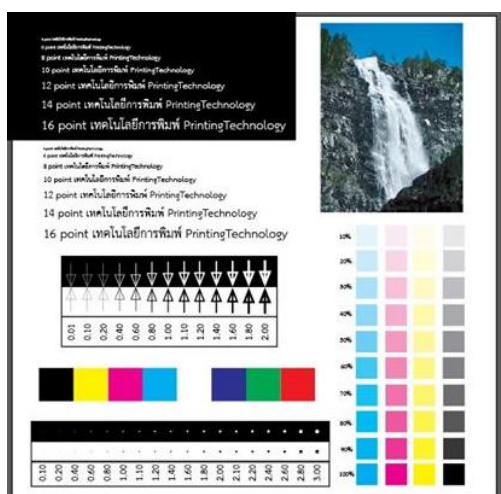
5.7 ค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาษ (มาตรฐาน ISO 12647-1) นำแผ่นกระดาษตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวทั้งแบบชั้นเดียวและสองชั้นพิมพ์แบบทดสอบงานพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก ความละเอียด 1,200 dpi หัวพิมพ์ (Print head) จำนวน 4 หัว (CMYK) (Inkjet Printer, Deskjet ink Advance 220hc, HP, Germany) และวัดค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาษในแต่ละสี ๆ ละ 5 ซ้ำ นำมาหาค่าเฉลี่ย โดยกำหนดโหมดในการวัดตาม ISO5-4:2009(E) (Gas filled tungsten (Illuminant A) และสภาวะการวัดตาม ISO 13655:2009 (M0, Unpolarized, no filter, UV include) และรองหลังด้วยกระดาษสีดำ (Black backing) (Spectrodensitometer, Exact Avance, Xrite, USA)

5.8 การทดสอบวัดคุณภาพงานพิมพ์ ประกอบด้วยรายละเอียดขนาดของเส้น รายละเอียดขนาดตัวอักษร โดยใช้ตาคนในการอ่าน โดยวางชิ้นงานในตู้เทียบสีงานพิมพ์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต D65 (Pantone Color Viewing, Just-normlicht, Germany) กำหนดเพศชายจำนวน 5 คน และเพศหญิงจำนวน 5 คน อายุเฉลี่ย 22 ปี กำหนดระยะห่างในการอ่าน 300 มิลลิเมตร กำหนดเวลาในการดู 1 วินาที ประเมินโดยการอ่านตัวหนังสือ

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. น้ำหนักสารเคลือบคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสบนแผ่นกระดาษ

ตารางที่ 1 แสดงน้ำหนักสารเคลือบคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เคลือบลงบนกระดาษ แผ่นกระดาษตัวอย่างที่วัดได้หลังจากเคลือบด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหนึ่งชั้นและสองชั้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน น้ำหนักสารเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นทั้ง 3 ความเข้มข้นรวมทั้งเมื่อมีการเคลือบเป็นสองชั้นน้ำหนักของสาร



รูปที่ 1 แบบทดสอบงานพิมพ์ (Test form)

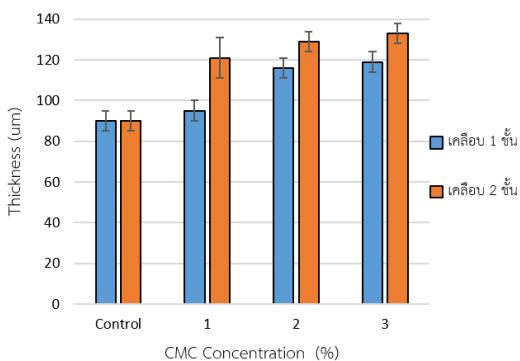
เคลือบยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย น้ำหนักสารเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณวัสดุเคลือบที่เคลือบอยู่บนผิวของกระดาษอันเนื่องมาจากสารเคลือบชั้นแรกแทรกซึมเข้าไปในเนื้อกระดาษและไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยทำให้สารเคลือบชั้นที่สองซึมลงไปรูของกระดาษได้น้อยลงซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Elyas Afra และคณะที่ได้ทำการศึกษาการเคลือบนาโนเซลลูโลสลงบนกระดาษ [5]

2. ความหนากระดาษ (Thickness)

ความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้นหลังจากเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสและมากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่สูงขึ้นหรือจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1) ตามผลของน้ำหนักสารเคลือบกระดาษเคลือบสองชั้น 1% (w/v) จะหนากว่ากระดาษเคลือบด้วย 2% (w/v) และ 3% (w/v) หนึ่งชั้น ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 น้ำหนักสารเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

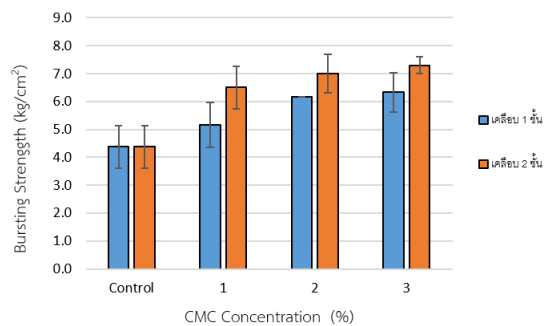
Coat weight (g/m ²)	Number of layer	Coat concentration (%)
4.2	1	1
5.4	2	1
4.8	1	2
5.5	2	2
5.1	1	3
5.8	2	3



รูปที่ 2 ความหนาของกระดาษผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

3. ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength)

รูปที่ 3 แสดงถึงกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีความต้านทานแรงดันทะลุสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านกระบวนการเคลือบผิว คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสเกิดเป็นชั้นที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของกระดาษและอยู่ในระหว่างเส้นใยของกระดาษทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงดันทะลุสูงขึ้น จากผลการศึกษาการเพิ่มปริมาณน้ำหนักสารเคลือบที่เกิดจากการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสและจำนวนชั้นการเคลือบทำให้ความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น 2 kg/cm² ความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสองชั้นที่ระดับความเข้มข้นคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 1% (w/v) นั้นมากกว่ากระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสชั้นเดียวที่ระดับความเข้มข้น 2% (w/v) และ 3% (w/v)

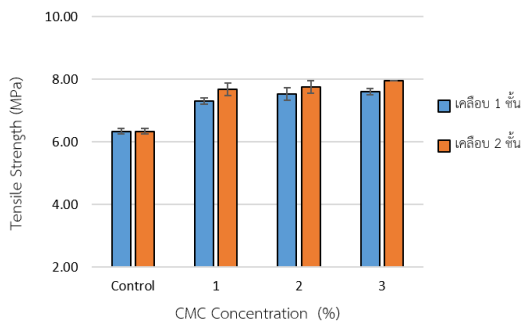


รูปที่ 3 ความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

4. การทดสอบสมบัติทางด้านความต้านแรงดึง (Tensile Strength)

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากระดาษเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้รับการเคลือบ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสามารถสร้างชั้นที่แข็งแรงด้วยสัดส่วนการยึดเหนี่ยวสูงซึ่งส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของกระดาษเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

เพิ่มขึ้น ในผลการวิจัยการเพิ่มน้ำหนักสารเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส อันเป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสและจำนวนชั้นทำให้ความต้านทานแรงดึงของกระดาษเพิ่มขึ้นประมาณ 2 Mpa ความต้านทานแรงดึงของกระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสองชั้นที่ระดับความเข้มข้น 1% (w/v) นั้นมากกว่ากระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสชั้นเดียวที่ระดับความเข้มข้น 2% (w/v) และ 3% (w/v)

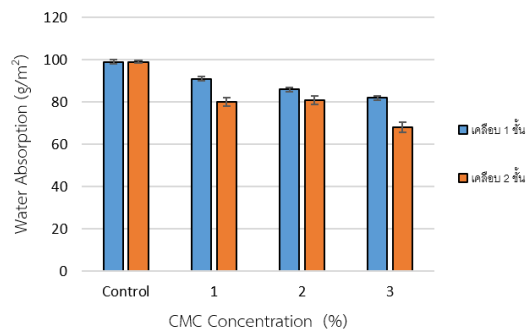


รูปที่ 4 ความต้านทานแรงดึงของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

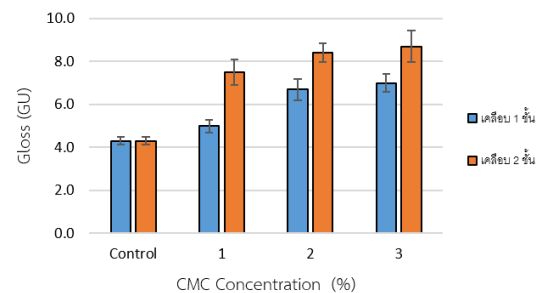
5. การดูดซึมน้ำของกระดาษ

จากผลการวิจัยการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าลดลงเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสบนพื้นผิวของกระดาษ (รูปที่ 5) การลดลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสเกิดเป็นชั้นบาง ๆ บนผิวกระดาษทำให้รูบนผิวของกระดาษน้อยลงเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ ดังนั้นน้ำจึงสามารถซึมผ่านพื้นผิวได้น้อยลงอีกทั้งเมื่อมีการเคลือบเป็นสองชั้นกระดาษมีประสิทธิภาพการดูดซึมน้ำที่ลดลงไปและเมื่อทำการเปรียบเทียบในแต่ละความเข้มข้นอัตราการดูดซึมน้ำในกระดาษเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสองชั้นระดับความเข้มข้น 3% (w/v) มีอัตราการดูดซึมที่น้อยกว่ากระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสองชั้นที่ระดับความเข้มข้น 1% (w/v) และ 2% (w/v) จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Elyas Afra และคณะ [5] ซึ่งจาก

ผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำกระดาษไปประยุกต์ใช้ในการหีบห่อได้



รูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส



รูปที่ 6 ความมันเงาของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

6. ความมันเงา (Gloss)

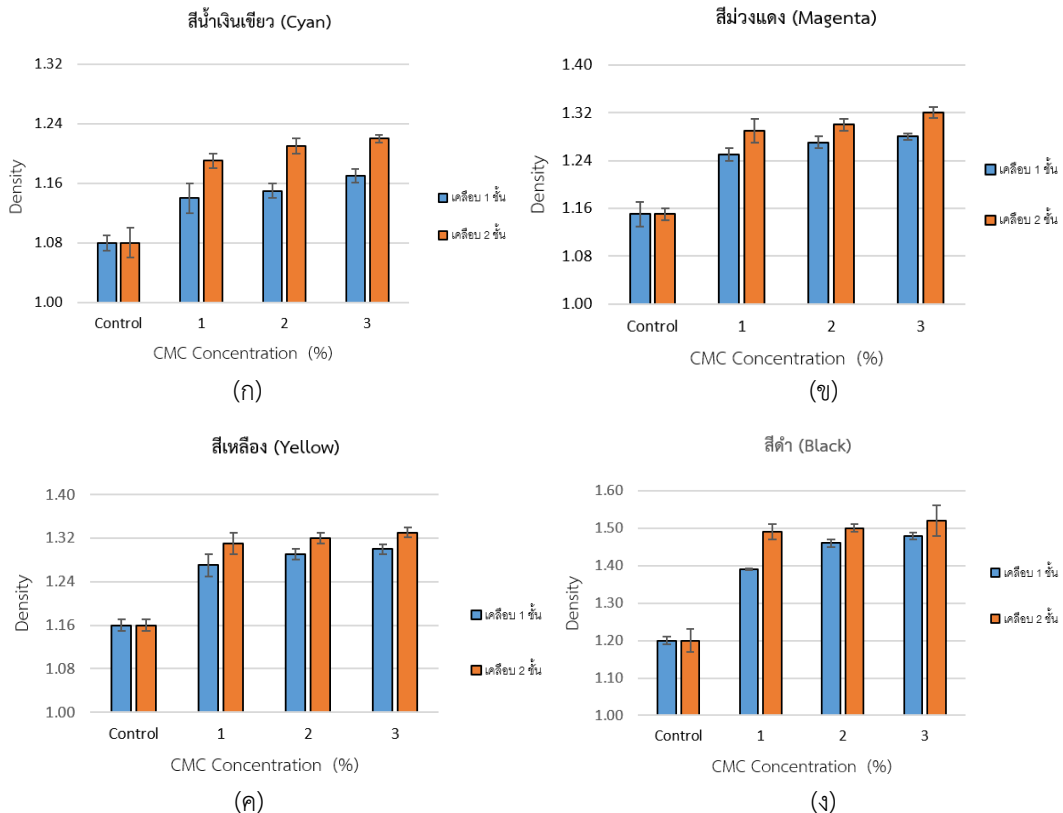
หนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของการพิมพ์กระดาษก็คือความเรียบและความมันเงาของกระดาษจะส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ จากผลการวิจัยค่าความมันเงาของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (รูปที่ 6) เกิดจากรูบนผิวกระดาษที่เต็มไปด้วยอนุภาคของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่หนาแน่นบนผิวของกระดาษ

7. ค่าความด้าของงานพิมพ์ (Density)

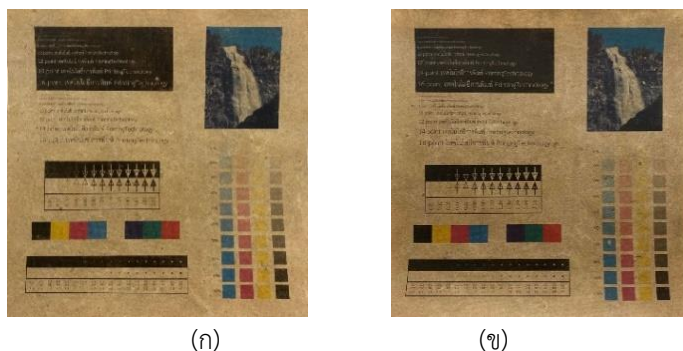
ค่าความด้า (Density) ของงานพิมพ์บนกระดาษเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ซึ่งแสดงถึงปริมาณหมึกพิมพ์ที่อยู่บนกระดาษโดยวัดค่าความด้าจากแถบพื้นตายของหมึกพิมพ์แต่ละสี

ผลการวิจัย ค่าความดำของหมึกพิมพ์ทุกสีประกอบด้วย สีน้ำเงินเขียว (Cyan) สีม่วงแดง (Magenta) สีเหลือง (Yellow) และสีดำ (Black) มีค่าความดำเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากการเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสบนผิวกระดาษทำให้รูบนผิวของกระดาษน้อยลงหมึกพิมพ์เป็นหมึกพิมพ์ฐานน้ำ (Water Base Ink) แทรกซึม

ลงไปในกระดาษได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว (รูปที่ 7) กระดาษเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสองชั้นระดับความเข้มข้น 1% (w/v) ค่าความดำมากกว่ากระดาษที่เคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสชั้นเดียวที่ระดับความเข้มข้น 2% (w/v) และ 3% (w/v)



รูปที่ 7 ค่าความดำของงานพิมพ์บนกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ก) สีน้ำเงินเขียว (ข) สีม่วงแดง (ค) สีเหลือง (ง) สีดำ



รูปที่ 8 การเก็บรายละเอียดงานพิมพ์ของกระดาษ (ก) กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ข) กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

8. การทดสอบวัดคุณภาพงานพิมพ์

กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิ-เมทิลเซลลูโลส จะมีสีเหลืองอมน้ำตาลมีผิวที่มีรูพรุนเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่าภาพพิมพ์บริเวณพื้นตาย (Solid) หมึกพิมพ์มีลักษณะที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสจะมีสีน้ำตาลมีผิวที่เรียบกว่าเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าบริเวณภาพพื้นตาย (Solid) หมึกพิมพ์มีลักษณะที่เรียบสม่ำเสมอ (รูปที่ 8)

ตารางที่ 2 การเก็บรายละเอียดขนาดเส้นดำพื้นขาว (Positive) ของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

Number of layer	Coat concentration (%)	Dot size (mm)			
		0.004	0.007	0.014	0.21
0	0	x	x	/	/
1	1	x	/	/	/
2	1	x	/	/	/
1	2	x	/	/	/
2	2	x	/	/	/
1	3	x	/	/	/
2	3	x	/	/	/

ตารางที่ 3 การเก็บรายละเอียดขนาดเส้นขาวพื้นดำ (Negative) ของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

Number of layer	Coat concentration (%)	Dot size (mm)			
		0.004	0.007	0.014	0.21
0	0	x	x	/	/
1	1	x	/	/	/
2	1	x	/	/	/
1	2	x	/	/	/
2	2	x	/	/	/
1	3	x	/	/	/
2	3	x	/	/	/

ตารางที่ 2 และ 3 พบว่ากระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสามารถเก็บรายละเอียดขนาดของเส้นได้ตั้งแต่ 0.014 มิลลิเมตร และกระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสในทุกความเข้มข้นสามารถเก็บรายละเอียดขนาดของเส้นได้ตั้งแต่ 0.007 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการเคลือบกระดาษเยือกด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้กระดาษเรียบรองรับหมึกพิมพ์ได้ดีขึ้นจึงสามารถเก็บรายละเอียดเส้นที่มีขนาดเล็กได้

ตารางที่ 4 การเก็บรายละเอียดขนาดตัวอักษรดำพื้นขาว (Positive) ของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

Number of layer	Coat concentration (%)	Text size (mm)			
		0.14	0.21	0.28	0.35
0	0	x	x	x	/
1	1	x	x	/	/
2	1	x	x	/	/
1	2	x	x	/	/
2	2	x	x	/	/
1	3	x	x	/	/
2	3	x	x	/	/

ตารางที่ 5 การเก็บรายละเอียดขนาดตัวอักษรขาวพื้นดำ (Negative) ของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส

Number of layer	Coat concentration (%)	Text size (mm)			
		0.14	0.21	0.28	0.35
0	0	x	x	x	/
1	1	x	x	/	/
2	1	x	x	/	/
1	2	x	x	/	/
2	2	x	x	/	/
1	3	x	x	/	/
2	3	x	x	/	/

ตารางที่ 4 และ 5 พบว่ากระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสสามารถเก็บรายละเอียดขนาดของตัวอักษรได้ตั้งแต่ 0.35 มิลลิเมตร และกระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสในทุกความเข้มข้นสามารถเก็บรายละเอียดขนาดของตัวอักษรได้ตั้งแต่ 0.28 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการเคลือบกระดาษเยื่อกล้วยด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้กระดาษเรียบรองรับหมึกพิมพ์ได้ดีขึ้นจึงสามารถเก็บรายละเอียดตัวอักษรที่มีขนาดเล็กได้

9. ผลการประเมินต้นทุนในการผลิตและพัฒนากระดาษ

เยื่อกล้วยปริมาณ 2 กิโลกรัม ราคา 350 บาท ใช้ผลิตเป็นแผ่นกระดาษขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ปริมาณ 25 กรัม/แผ่น ดังนั้นเยื่อกล้วย 2 กิโลกรัม จะสามารถผลิตกระดาษได้จำนวน 80 แผ่น เฉลี่ยราคาแผ่นละ 4.38 บาท สารเคลือบคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส 1 กิโลกรัมราคา 296 บาท การเคลือบกระดาษชั้นเดียว ใช้สารเคลือบปริมาณ 4.7 กรัมต่อตารางเมตร ดังนั้นกระดาษขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ใช้สารเคลือบปริมาณ 0.19 กรัม/แผ่น เป็นราคา 0.64 บาท การเคลือบกระดาษ 2 ชั้น ใช้สารเคลือบปริมาณ 5.57 กรัมต่อตารางเมตร ดังนั้นกระดาษขนาดกว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ใช้สารเคลือบปริมาณ 0.22 กรัม/แผ่น เป็นราคา 0.74 บาท เมื่อรวมราคากระดาษกับการเคลือบชั้นเดียวกระดาษจะมีราคาอยู่ที่ 5.02 บาท และกระดาษที่มีการเคลือบสองชั้นจะมีราคาอยู่ที่ 5.12 บาท

สรุปผล

กระดาษที่เคลือบด้วยคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกันทั้งการเคลือบหนึ่งชั้นและสองชั้นส่งผลต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงของกระดาษโดยความแข็งแรงของกระดาษจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใย ความแข็งแรงของ

พันธะระหว่างเส้นใย ลักษณะการเรียงซ้อนของเส้นใย การเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษที่เกิดจากการเติมสารเติมแต่งสะท้อนให้เห็นในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของเส้นใย และการก่อตัวของพันธะไฮโดรเจนด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของ CMC นั้นบางมาก และอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ ดังนั้น พื้นที่ผิวจำเพาะจึงมีขนาดมากขึ้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนสูง หมูไฮดรอกซิลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงขึ้นกับกลุ่มไฮดรอกซิลบนเส้นใย ดังนั้น CMC จึงถือเป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพกระดาษที่ดีเยี่ยมในการปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของกระดาษ [4] จากสรุปผลงานวิจัยดังกล่าวกระดาษที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์ประเภทหีบห่อได้หรือสามารถนำไปใช้กับการพิมพ์งานต่าง ๆ ได้เช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ และคณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มทร.ธัญบุรี ศูนย์นวัตกรรมออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนท์ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยปีงบประมาณ 62-64 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Office of Industrial Economics. Economic news [Internet]. [cited 2021 Nov 10]. Availability from: <https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/Industry%20conditions/Q1-2564.pdf>. Thai.
2. Lichanporn I, Akkarakultron P. [Effect of packaging types on quality of dried lotus stamens]. JARST. 2021;20(1):91-102. Thai.
3. Jinaohan N, Sangsuwan J, Suttasupa S, Khamthai S. [Properties of carboxymethyl

- cellulose (CMC) film from rice straw pulp].
Agricultural Sci J. 2012;43(3):616-20. Thai.
4. Li A, Xu D, Luo L, Zhou Y, Yan W, Leng X, et al.
Overview of nanocellulose as additives in
paper processing and paper products.
Nanotechnol Rev. 2021;10(1):264–81.
5. Afra E, Mohammadnejad S, Saraeyan A.
Cellulose nanofibils as coating material and
its effects on paper properties. Pro Org.
2016;101:445-60.



Low Density Polyethylene/Organoclay Nanocomposites Manufactured Using Oxidized Polyethylene as a Coupling Agent and the Flame Retardant Additive

Haydar U. Zaman* and Ruhul A. Khan

Institute of Radiation and Polymer Technology, Bangladesh Atomic Energy Commission, P.O. Box 3787, Savar, Dhaka, BANGLADESH

*Corresponding author e-mail: haydarzaman07@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: August 23, 2021

Revised: February 25, 2021

Accepted: March 9, 2022

Available online: May 10, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.3

Keywords: low density polyethylene, oxidized polyethylene, organoclay, mechanical properties, flame retardant properties

Low-density polyethylene (LDPE)/organoclay (cloisite 20A, abbreviation: C20A) nanocomposites were melted in this exploration by intercalation technique with low molecular weight oxidized polyethylene (OxPE) as a coupling agent. The effects of OxPE on morphology, mechanical, thermal, flame retardant properties were identified by transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), tensile test, differential scanning calorimetry (DSC), and flammable tests, respectively. XRD and TEM results exhibited that the interlayer distance of the nanoparticle layers were increased and a partial intercalated structure was prepared with an intercalated technique. Mechanical experiments exhibited that the inclusion of 5 wt% C20A in LDPE was significantly improved the tensile strength and tensile modulus with reduced elongation at break compared to base polymer LDPE. The inclusion of OxPE in LDPE/C20A further enhances the tensile properties of nanocomposites. In the case of virgin LDPE, there was an increase of 53% for tensile strength and 66% for tensile modulus. Nevertheless, the crystallization temperature of the specimens increased significantly and the degree of crystallization in the nanocomposite increased with increasing coupling concentration. Substantial enrichment of flame retardant properties has been observed for ternary nanocomposites.

INTRODUCTION

Over the last few decades, the use of layered silicate nanoparticles, such as polymer-reinforced clay, has charmed much academic and industrial interest due to the expected improvement in properties. In nanotechnology, polymer nanocomposites consist of a polymer matrix filled with a layered silicate that dispersed at a nanoscale phase. When the elements are well-defined by their size, at least one of the three external dimensions is about 1 nm to 100 nm [1]. Hybrid ingredients are formed by adding inorganic nanoparticles to the organic polymer matrix to form a class of polymer/clay nanocomposites. Generally, natural clay polymers are used as cheap raw components to manufacture nanocomposites due to their structural and availability. Inorganic nanoclay, which is commonly used, is montmorillonite, which has an aluminosilicate structure, with two tetrahedral silica sheets containing an octahedral alumina sheet. Polymer/clay nanocomposites exhibit higher mechanical properties [2-3], compressive gas permeability, increased solvent resistance, high thermal distortion temperature (HDT), and increased flame retardant properties [4-7] than virgin polymer. Improved properties, including many exfoliated clay dispersing polar groups, are achieved by allowing the clay to easily disperse into such polymer matrix [8], while some studies of nonpolar polymers, such as polyolefin (PP or PE) have found a lower degree of clay exfoliation in the polymer matrix due to

their hydrophilicity and poor interaction with the polar aluminosilicate surface of the clay [9].

Nanocomposite materials have gained important industrial interest and research endeavors to inspire the improvement of nanocomposite as well as other polymers. There are three ways to synthesize polyolefin/clay nanocomposites, namely situ polymerization, solution method and melt compounding method. From all of these, the melt compounding method is the simplest and most cost-effective way to manufacture nanocomposites. Polyethylene/organoclay nanocomposites are interested in the melt compounding process [10-11]. Zhang et al. [12] reported that the flammability properties of polyethylene-clay nanocomposites have a significant reduction in peak release rate and also observed that polyethylene-clay nanocomposites have a mixed immiscible-intercalated structure. Natural montmorillonite, however, is hydrophilic so it is not compatible with many hydrophobic engineering polymers, as most polymer-layered silicates do not dispersed easily. To get over this problem, a simple cation exchange procedure is used to produce montmorillonite clay organophilic. Thus, interfacial interactions between the clay layer and the polyolefin matrix should be introduced to develop polymer nanocomposite with modified polar group called coupling agents or interfacial agents in nanocomposite structures [13]. Maleic anhydride grafted polyolefin is commonly used as a compatibilizer. Many experimental results have shown the preparation and physical properties of manufactured polypropylene

nanocomposites of maleic anhydride grafted polypropylene [14-15]. Polyethylene/organo-clays, on the other hand, are less exposed to nanocomposites due to their non-polar chain structure and lack of thermodynamic forces, which is a great challenge to achieve structure [16]. In less research, some authors have suggested that low molecular weight (LMW) reactive compounds can be successfully used as a coupling agent for polyethylene nanocomposites [17-18]. They suggested that these functional oligomeric compounds could easily disperse into clay galleries and cause an additional delamination because they have much greater mobility during nanocomposite processing than their high molecular weight. Literary data on the use of low molecular weight oxidized polythene (OxPE) as a coupling agent for polymer/clay nanocomposites are relatively rare. In this research, we used low molecular weight (LMW) OxPE as a coupling agent to manufacture LDPE/organo-clay nanocomposite. OxPE is a modified, LMW polyethylene that has several functions, for example, mainly carboxylic acids, esters and ketones. It was used as a processing aid in some polymer blends as a coupling agent and coating formula. OxPEs have also been used in polymer blends as coupling agent. In the present study, the effects of coupling agent content and the clay dispersion on the morphological, mechanical, thermal and flame retardant properties of LDPE/organo-clay nanocomposite were investigated.

EXPERIMENTAL

Materials and nanocomposite preparations

Granules of low-density polyethylene (LDPE) (density = 0.918 g/cm^3 , MI = 3 g/10 min) (trade name: Cosmoplene) were supplied by the Polyolefin Company, Private Ltd., Singapore. Low molecular weight oxidized polyethylene (molecular weight, M_n : 2950; acid number: 30) provided by Honeywell (AC[®] 330) was used as a coupling agent. Commercial organoclay Cloisite 20A (C20A) supplied Southern Clay Products. C20A was produced by cation exchange with 0.95 meq/g of dimethyl-dehydrogenated tallow ammonium chloride in sodium montmorillonite (Cloisite Na⁺, with a CEC of 0.926 meq/g). Tallow proportional (50%) may be a composition of unsaturated n-alkyl groups with approximate compositions: 65% C18, 30% C16, and 5% C14; hydrogenated tallow has only 3% unsaturation. The polymer and organoclay were dried in an air-circulating oven at a constant weight of 80°C. Compositions of LDPE/organo-clay nanocomposite are listed in Table 1.

Table 1 Sample compositions.

Sample Code	LDPE (wt%)	OxPE (wt%)	Cloisite-20A (wt%)
LDPE	100	-	-
LC5	95	-	5
LC5O10	85	10	5
LC5O15	80	15	5
LC5O20	75	20	5

LDPE: Low-density polyethylene; OxPE: Low molecular weight oxidized polyethylene

The nanocomposites were made by mixing LDPE/5 wt% organoclay (LC5) and LC5/OxPE with 10, 15, and 20 wt% of OxPE using melt compounding in a co-rotating twin-screw extruder (Brabender Plasticorder, model: PLE-331). During polymer and organoclay loading, the rotor speed and temperature were maintained at 30 rpm and 180 °C, for 3 min, respectively, then gradually increased to 60 rpm. The general blending time was 10 min. After blending, the mixture was poured into a mold and therefore the molten nanocomposites were obtained by a hot compression-molding machine. The mixture was pressed at 10 MPa during a hydraulic press (Carver Laboratory Press, USA, Model 3856) at 190 °C for 10 min. After that, the nanocomposite sample containing steel plates was cooled to another press (Carver Laboratory Press, USA, Model 2518) operated at cooling condition. Films of 2 mm thickness were made and cut to standard sizes and shapes to test the mechanical properties.

Nanocomposite test

The morphology of nanocomposites in LDPE/C20A has been observed using transmission electron microscopy (TEM: JEM 2010 F) with an acceleration voltage of 200 kV. A Sorvall MT6000 microtome was accustomed to cut the skinny part (70 nm) of the specimen at room temperature.

The degree of intercalation or exfoliation was assessed with XRD. The XRD patterns were recorded employing a Philips X'pert MPD (40 kW, 30 mA) operating with Cu-K α radiation (λ = 0.15406 nm) at 40 kV and 30 mA within

the range of 2θ = 1-10° with a scan speed of 0.02°/s. Interlayer spacing of the silicate layers was determined using the peak positions according to Bragg's law: $d = \lambda / (2\sin\theta)$, where λ is the wave length, 0.154 nm, θ is the diffraction angle and d is the basal space between clay layers.

The tensile properties of virgin LDPE and LDPE/C20A nanocomposites were examined by tensile strength, tensile modulus, and elongation at break. Standard specimens were sampled from compression molded sheets and then conditioned at temperature of (25 ± 2) °C and relative humidity of $50 \pm 5\%$ for 24 h. To analyze the tensile properties of LDPE/C20A nanocomposites, the test was performed on a screw-driven universal testing machine (Instron-4466) equipped with 10 kN electronic load cells and mechanical grips at a crosshead speed of 30 mm/min according to ASTM standards. All values were measured 5 times to take the average value.

The thermal behavior of the specimens was analyzed by differential scanning calorimetry (DSC). Crystallization behavior of the specimens was performed on DSC-Mettler. In an aluminum crucible, a sample weighing about 5–8 mg was heated to 180 °C from room temperature with a heating rate of 10 °C/min and kept at this temperature for 5 min to remove the thermal history. It was then cooled to room temperature with a cooling rate of 10 °C/min and reheated to 180 °C with a heating rate of 5 °C/min. All heating and cooling runs were conducted under

a helium atmosphere at a flow rate of 25 ml/min. Melting peak temperature (T_m) and melting enthalpy (ΔH_m in J/g) were obtained from the second heat run. The degree of crystallinity (X_c %) was calculated using the melting enthalpy of the specimens in step with the subsequent equation:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \quad (1)$$

where ΔH_m^0 is the melting enthalpy of the 100% crystalline form of PE (279 J/g) (19)

The flammability of virgin LDPE and nanocomposites was assessed by ascertaining their limiting oxygen index (LOI). Measurements were performed using FTA flammability equipment, supplied by Stanton Redcroft, by ASTM D-2863. The burn rate was set to LOI = 21.8 as the length of the plate which burns for one second.

RESULTS AND DISCUSSION

Organoclay dispersion analysis

It is well known that the dispersion of fillers in the polymer matrix can have a significant influence on the mechanical properties of the nanocomposite. Dispersion filler in thermoplastics isn't an easy process. The problem is even more severe, when using nanoparticles as filler, because the nanoparticles have a strong tendency to agglomerate. Consequently, homogeneous dispersion of the nanoparticles in the thermoplastic matrix is a difficult process. A good dispersion can be achieved by adding a coupling agent such as OxPE. The dispersion of organoclay in

LDPE nanocomposite was also confirmed by TEM monitoring. Figure 1(a-d) displays TEM micrographs of LDPE/C20A nanocomposites consisting of 5 wt% C20A (designated as LC5), LDPE/5 wt% C20A/10 wt% OxPE (denoted as LC5O10), LDPE/5 wt% C20A/15 wt% OxPE (marked as LC5O15), and LDPE/5 wt% C20A/20 wt% OxPE (abbreviated as LC5O20). Figure 1 (a) shows the dispersion of C20A particles in LDPE matrix. It can be seen that most C20A particles form agglomerates in LDPE matrix due to the incompatibility between nanoparticles and LDPE matrix. The black shape represents the tactoids in C20A and the rest of the region represents an uninterrupted LDPE. Nevertheless, some black shapes may indicate some poorly dispersed C20A agglomerates. Figure 1 (b) on the other hand shows relatively fewer particles in C20A than in Figure 1 (a) and the C20A particles were separated into lighter parts by the method of mixing. Anyway, image exfoliated structures (white arrows) for LC5O15 (Figure 1 c) showed well-dispersed structures although several clay agglomerates and intercalated structures appeared simultaneously. Most C20A aggregates are broken down to primary particles. This should maximize the interfacial interaction between the C20A particles and the LDPE. This morphological monitoring by TEM was very consistent with other researchers [20]. However, both unexfoliated clay tactoid and exfoliated platelets are present in Figure 1 (d). The LC5O20 sample has a large clay tactoid that correspond to intercalated structure. It can be clearly seen that the aspect ratio of clay layers in LC5O20 is higher than the

aspect ratio of LC5O15. The stiffness of these probes can be attributed to the dispersion of silicate layers, which can determine the polymer phases which increase the stiffness which increase the stiffness [21]. These observations are supported by the results of the XRD analysis.

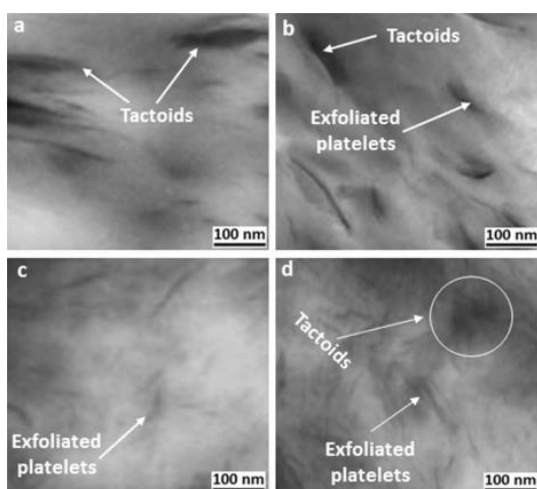


Figure 1 TEM images of nanocomposite samples: (a) LC5, (b) LC5O10, (c) LC5O15, and (d) LC5O20

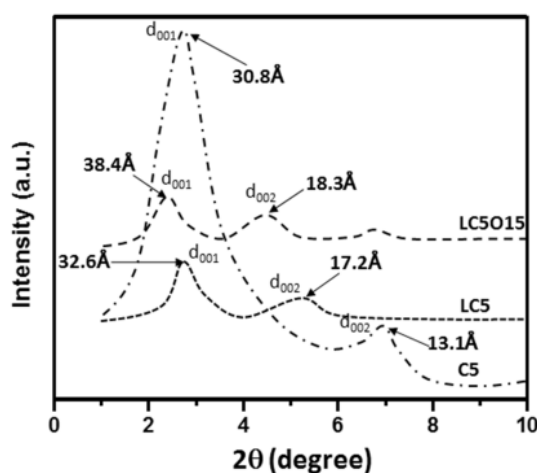


Figure 2 XRD patterns of 5 wt% C20A (C5), LDPE/5 wt%C20A (LC5) and LDPE/5 wt% C20A/15 wt% OxPE (LC5O15) nanocomposites

Dispersibility of clay layers in LDPE matrix

The structure of polymer/clay nanocomposites is conventionally described using X-ray diffraction (XRD). Due to the periodic arrangement of silicate layers, XRD is the most widely used technique for identifying clay-intercalated structures. The XRD patterns of cloisite 20A (C20A), LDPE/5 wt%C20A (LC5) and LDPE/5 wt% C20A/15 wt% OxPE (LC5O15) nanocomposites are shown in Figure 2. Two diffraction peaks are observed for the 5 wt% C20A (C5) corresponding to basal spacing of $d_{001} = 3.09 \text{ nm}$ ($2\theta = 2.86^\circ$) and $d_{002} = 1.31 \text{ nm}$ ($2\theta = 6.74^\circ$) by using the Bragg equation. The d_{001} plane reflection of LC5 without coupling agent is observed at $2\theta = 2.71^\circ$ corresponds to $32.6 \text{ \AA}$ interlayer spacing. However, with adding OxPE, the peaks are shifted to lower angles in the nanocomposites. The d_{001} plane reflection of LC5O15 is observed at 2θ value of 2.29° , corresponding to $38.4 \text{ \AA}$ [22]. The peak height of the ternary nanocomposites (LC5O15) was very small, indicating an intercalated/exfoliated structure. This clearly indicates the strong intercalation/exfoliation capacity of OxPE in the silicate layers. The driving force of the intercalation arises from the hydrogen bonding between the acidic carboxyl group of OxPE and the oxygen groups of silicates.

Tensile properties of LDPE/organoclay nanocomposites

The mechanical properties of nanocomposites are directly related to the homogeneous clay dispersion and exfoliation or intercalation

of the polymer matrix. Interaction between exfoliated or intercalated nanoparticles and polymer matrix and large interfacial regions leading to high tensile strength, modulus and thermal stability. More uniform clay dispersion may result in higher strength and modulus but at the expense of distortion and toughness such as elongation at break and impact resistance. The tensile properties of LDPE, LDPE/5 wt%C20A (LC5), and LC5 nanocomposites with different coupling contents are illustrated in Figure 3. It was observed that when 5 wt % C20A (C5) was added to virgin LDPE, the tensile strength (TS) and tensile modulus (TM) of virgin LDPE increased with reduced elongation at break (Eb) and their value increased significantly as the OxPE content increased, but the Eb continuous declined. With C5 loading, the TS increased by about 22%, the TM enhanced by about 17% and the Eb reduced by about 30% compared to virgin LDPE. The increased tensile properties can also lead to a rich interfacial bond between the matrix and C5 due to the C5 long aliphatic chain leading to a rich interfacial bond between the matrix and C5. In general, the inclusion of organoclay in polymeric substances tends to reduce Eb. The results of Eb are illustrated in Figure 4. As seen in Figure 4, Eb of nanocomposites of the same C5 content followed this trend. Eb for nanocomposite samples decreased compared to LDPE. Typically, the filler causes a reduction in matrix deformation due to a role of mechanical barrier [23].

The OxPE load reinforcing facility has been well observed in this investigation. It's

interesting to determine how the OxPE was served in terms of the mechanical properties. The effect of OxPE load on the tensile properties of nanocomposites is shown in Figure 3. As can be seen in Figure 3, both TS and TM increased when adding OxPE with different content. OxPE nanocomposites exhibited a significant increase in TS compared to LC5 nanocomposites up to 15 wt% of OxPE loading and then decreased with increasing OxPE loading, while the TM of OxPE nanocomposites continuously increased up to 20 wt% of OxPE loading. The highest values obtained were 21.9 and 301 MPa, respectively, an increase of about 53% and 66% over virgin LDPE. Enhancement is achieved through strong hydrogen bonding between the -OH group of OxPE and the oxygen of silicate to the reinforcement of intercalated nanolayers, thereby increasing the inter-gallery space of the nanoclay [24]. At higher OxPE loads, the tensile test showed a decrease in nanocomposites due to lower exfoliation and dispersion of nanocomposites. The increased tensile performance of the OxPE mixture (when compared to the unmodified system) is sometimes explained by the fine dispersion generated by the OxPE and by an improved solid-state adherence, which ends up in stress transfer at the dispersion phase from the matrix. Considering the tensile test results of the samples, we have concluded that enhancement in mechanical properties not only originated from the state of organoclay dispersion, but was also affected by the crystalline nature of the OxPE employed.

The TM of LDPE/5 wt% C20A/OxPE nanocomposites has improved dramatically with OxPE content. The increase in stiffness can be attributed to the dispersion of silicate layers, which can immobilize the polymer phases that stiffen the growth [21]. In contrast, the tensile elongation at break of the LDPE/5 wt% C20A/OxPE nanocomposites is reduced with OxPE content. This reduction in Eb of the nanocomposites as compared with the unfilled polymer is attributed to the fact that fillers generally decreases the ductility of polymers and similar trends are also seen for nanocomposites [25]. This suggests that the OxPE is effective in increasing adherence between C5 and LDPE molecular chains. A reduced Eb often means a reduced energy to break. In short, better tensile properties were obtained due to better exfoliation and good dispersion of C5 in the LDPE matrix.

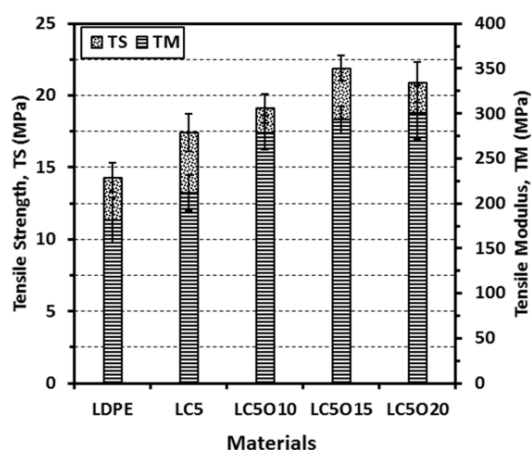


Figure 3 Tensile strength and modulus of virgin LDPE and its nanocomposites

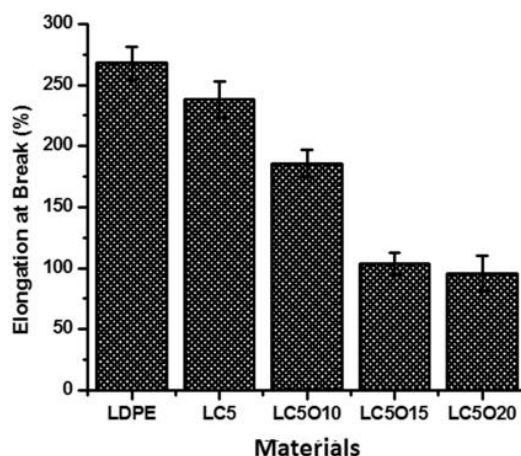


Figure 4 Elongation at break of virgin LDPE and its nanocomposites

Thermal properties of nanocomposites

Figure 5 (A) displays the crystallization exotherms of virgin LDPE, LC5, LC5O10, and LC5O15 nanocomposites recorded at a cooling rate of 10°/min during the cooling cycle. The crystallization, melting peak temperatures and degree of crystallinity are tabulated in Table 2. This shows that the inclusion of organoclay and OxPE considerably changes the crystallization behavior of LDPE. As shown in Figure 5 (A), the crystallization peak temperature (T_c) of the samples shifted to a higher temperature than the virgin LDPE, with increasing the content of the OxPE. The T_c increased from 95.7 °C of LDPE to 99.8 °C of C5 nanocomposite. For LC5O10 sample, the T_c is increased up to 101.5 °C. It's noteworthy that the T_c of the LC5O15 sample increased to 102.9 °C, much larger than the LDPE and even larger than the LC5O10 nanocomposite. From Table 2, we can see that the melting peak temperature (T_m) has changed slightly with the increase in the content of the OxPE, and the T_m has increased slightly with increasing OxPE

content. This is responsible for the heterogeneous crystallization on the organoclay surface, which can develop the crystallization of LDPE, slightly increasing the T_m of the nanocomposite [26]. The T_m of virgin LDPE, LC5, LC5O10, LC5O15 and LC5O20 nanocomposites are in the range 109.6 °C-111.4 °C. Compared to virgin LDPE, the T_m of nanocomposites is transferred at higher temperatures and the maximum T_m is obtained at LC5O15.

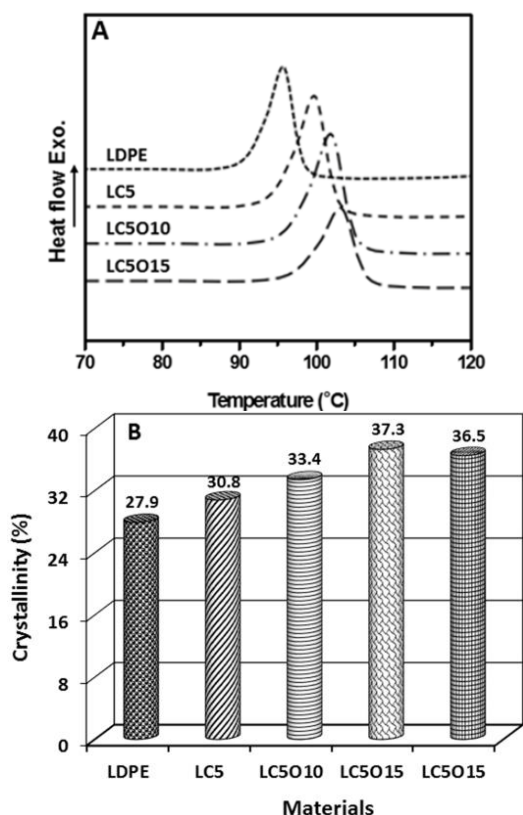


Figure 5 DSC (A) Crystallization exotherms and (B) crystallinity of virgin LDPE, LC5, LC5O10, LC5O15, and LC5O20 nanocomposites

Figure 5 (B) displays the variation in X_c (%) of the specimens. Influenced by the introduction of OxPE content in the nanocomposites of

LC5O10, LC5O15, and LC5O20, X_c was higher than virgin LDPE. The inclusion of organoclay and OxPE contents into semicrystalline polymers increases the crystallization rate, resulting in higher crystallinity and higher T_c . According to Zaman et al. [2], the inclusion of organoclay and OxPE to the LDPE matrix increases the crystallization percentage.

Table 2 Thermal properties of virgin LDPE and its nanocomposites.

Sample code	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
LDPE	95.7	109.6	77.8	27.9
LC5	99.8	109.9	85.9	30.8
LC5O10	101.5	110.5	93.1	33.4
LC5O15	102.9	111.4	104	37.3
LC5O20	102.6	111.1	101.8	36.5

Combustibility of the nanocomposites

The limiting oxygen index (LOI) is measured by the volumetric fraction of O_2 within the N_2 mixture, where the substances still burn, are:

$$LOI = O_2 / (O_2 + N_2)$$

The higher the LOI of a given material, the lower its combustibility. The LOI value of the specimens is displayed in Figure 6 (a). It's worth noting that the virgin polymer LDPE has a relatively high LOI. The LOI values of binary nanocomposites are only LC5 higher than that of virgin polymer components. Therefore, the presence of organoclay reduces the combustion of the polymer. LOI increased with OxPE content

increasing up to 15 wt% and then decreasing with increasing OxPE content. Furthermore, the presence of organoclay and the presence of OxPE lead to a significant reduction in the combustion rate of the substance up to 15 wt% (Figure 6 (b)). Nanocomposites exhibit burn retardant properties by creating a protective barrier to heat and mass transfer due to the accumulation of silicate and OxPE on the surface of the burning sample.

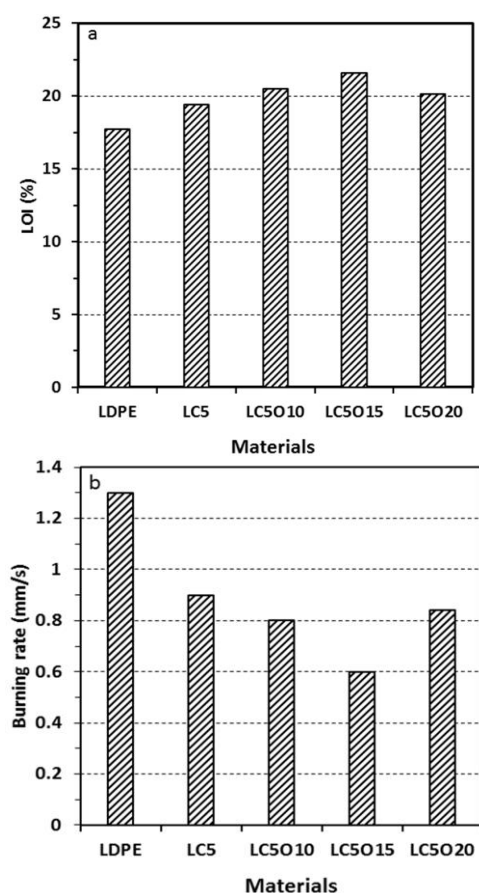


Figure 6 (a) Limiting oxygen index (LOI) of the virgin LDPE, LC5, LC5O10, LC5O15, and LC5O20 nanocomposites; (b) Burning rate of the virgin LDPE, LC5, LC5O10, LC5O15, and LC5O20 nanocomposites

CONCLUSIONS

In the present study, the tensile properties of LDPE/organoclay nanocomposites successfully manufactured by melt compounding method, using coupling agent (OxPE), were investigated. The characteristics of morphology, tensile properties, thermal behavior, and combustibility of LDPE/organoclay nanocomposites were examined by changes the inclusion of an OxPE. TEM photomicrographs exhibited that OxPE was effective in assisting the silicate platelet delamination. This outcome was also confirmed by the XRD of the specimens. The OxPE conferred higher tensile properties than control cases. DSC thermograms revealed that the crystallization temperature of the specimens increased significantly and the degree of crystallization in the nanocomposite increased with increasing OxPE concentration. However, melting and crystallization temperatures had a significant effect on blends and nanocomposites. The results show that LC5O15 nanocomposites have good flame retardant properties, which will be useful in terms of their application.

REFERENCES

1. Soundararajah Q, Karunaratne B, Rajapakse R. Montmorillonite polyaniline nanocomposites: Preparation, characterization and investigation of mechanical properties. *Mater Chem Phys*. 2009;113:850-55.
2. Zaman HU, Beg DH. Influence of two novel compatibilizers on the properties of LDPE/

- organoclay nanocomposites. *J Polym Eng.* 2014;34:75-83.
3. Zaman HU, Hun PD, Khan RA, Yoon K-B. Polypropylene/clay nanocomposites: Effect of compatibilizers on the morphology, mechanical properties and crystallization behaviors. *J Thermoplast Compos.* 2014;27:338-49.
 4. Bazmara M, Silani M, Dayyani I. Effect of functionally-graded interphase on the elasto-plastic behavior of nylon-6/clay nanocomposites; A numerical study. *Defence Technology.* 2021;17:177-84.
 5. Castro-Landinez JF, Salcedo-Galan F, Medina-Perilla JA. Polypropylene/ethylene- and polar-monomer-based copolymers/ montmorillonite nanocomposites: Morphology, mechanical properties, and oxygen permeability. *Polymers.* 2021;13:705.
 6. Singh VP, KK V, Sharma S, Kapur GS, Choudhary V. Polyethylene/sepiolite clay nanocomposites: effect of clay content, compatibilizer polarity, and molar mass on viscoelastic and dynamic mechanical properties. *J Appl Polym Sci.* 2017;134:45197.
 7. He W, Song P, Yu B, Fang Z, Wang H. Flame retardant polymeric nanocomposites through the combination of nanomaterials and conventional flame retardants. *Prog Mater Sci.* 2020;114:100687.
 8. Gómez-Aldapa CA, Velazquez G, Gutierrez MC, Rangel-Vargas E, Castro-Rosas J, Aguirre-Loredo RY. Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Mater Chem Phys.* 2020;239:122027.
 9. Depan D, Chirdon W, Khattab A. Morphological and chemical analysis of low-density polyethylene crystallized on carbon and clay nanofillers. *Polymers.* 2021;13:1558.
 10. Gill YQ, Song M, Abid U. Permeation characterization and modelling of polyethylene/clay nanocomposites for packaging. *Polym Bull.* 2020;77:3749-65.
 11. Wysocki S, Kowalczyk K, Paszkiewicz S, Figiel P, Piesowicz E. Green highly clay-filled polyethylene composites as coating materials for cable industry-A new application route of non-organophilised natural montmorillonites in polymeric materials. *Polymers.* 2020;12:1399.
 12. Zhang J, Wilkie CA. Preparation and flammability properties of polyethylene-clay nanocomposites. *Polym Degrad Stabil.* 2003;80:163-69.
 13. Seraji SM, Razavi Aghjeh M, Davari M, Salami Hosseini M, Khelgati S. Effect of clay dispersion on the cell structure of LDPE/clay nanocomposite foams. *Polym Composite.* 2011;32:1095-105.
 14. Lin TA, Lin M-C, Lin J-Y, Lin J-H, Chuang YC, Lou CW. Modified polypropylene/thermoplastic polyurethane blends with maleic-anhydride grafted polypropylene: Blending morphology and mechanical behaviors. *J Polym Res.* 2020;27:1-10.

15. Bakhtiari A, Ashenai Ghasemi F, Naderi G, Nakhaei MR. An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene/nitrile butadiene rubber/halloysite nanotube/polypropylene-g-maleic anhydride nanocomposites using response surface methodology. *Polym Composite*. 2020;41: 2330-43.
16. Awad SA. Mechanical and thermal characterisations of low-density polyethylene/nanoclay composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2020;10.1177/0967391120968441.
17. Kato M, Usuki A, Okada A. Synthesis of polypropylene oligomer—clay intercalation compounds. *J Appl Polym Sci*. 1997;66:1781-85.
18. Hasegawa N, Kawasumi M, Kato M, Usuki A, Okada A. Preparation and mechanical properties of polypropylene-clay hybrids using a maleic anhydride-modified polypropylene oligomer. *J Appl Polym Sci*. 1998;67:87-92.
19. Alamo R, Graessley W, Krishnamoorti R, Lohse D, Londono J, Mandelkern L. Small angle neutron scattering investigations of melt miscibility and phase segregation in blends of linear and branched polyethylenes as a function of the branch content. *Macromolecules*. 1997;30:561-66.
20. Durmus A, Kasgoz A, Macosko CW. Linear low density polyethylene (LLDPE)/clay nanocomposites. Part I: Structural characterization and quantifying clay dispersion by melt rheology. *Polymer*. 2007;48(15):4492-502.
21. Varghese S, Karger-Kocsis J. Natural rubber-based nanocomposites by latex compounding with layered silicates. *Polymer*. 2003;44: 4921-27.
22. Fatma Isik C, Ulku Y. Preparation and characterization of low density polyethylene/ethylene methyl acrylate glycidyl methacrylate/organoclay nanocomposites. *J Appl Polym Sci*. 2011;120:3087-97.
23. Zhang MQ, Rong MZ, Friedrich K. Application of non-layered nanoparticles in polymer modification. In book: *Polymer Composites*. 2005; 25-44.
24. Rong MZ, Zhang MQ, Zheng YX, Zeng HM, Walter R, Friedrich K. Structure–property relationships of irradiation grafted nano-inorganic particle filled polypropylene composites. *Polymer*. 2001;42:167-83.
25. Paul DR, Robeson LM. Polymer nanotechnology: Nanocomposites. *Polymer*. 2008;49:3187-204.
26. Zaman HU, Beg MDH. Influence of two novel compatibilizers on the properties of LDPE/organoclay nanocomposites. *J Polym Eng*. 2014;34:75-83.



Solar Ultraviolet Radiation for Psoriasis Treatment at Nakhon Pathom Province

Sumaman Buntoung^{1*}, Somjet Pattarapanitchai¹, Pradthana Laiwarin¹, Einapak Boontaveeyuwat² and Serm Janjai¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, THAILAND

²Photodermatology Unit, Division of Dermatology, Department of Medicine, King Chulalongkorn Memorial Hospital and Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, THAILAND

*Corresponding author e-mail: buntoung_s@silpakorn.edu

ARTICLE INFO

Article history:

Received: November 10, 2021

Revised: April 25, 2022

Accepted: May 5, 2022

Available online: June 6, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.4

Keywords: psoriasis, ultraviolet radiation, heliotherapy

ABSTRACT

Psoriasis is one of the long-term (chronic) skin diseases that cause problems to the immune system. Artificial light source in ultraviolet radiation (UV) wavelength, especially in the UV-B band, is one of the standard treatments for psoriasis. Alternatively, natural sunlight is also used for the treatment, called heliotherapy. Consistent solar radiation at a particular location and time is key to successfully giving a safe and effective natural sunlight treatment. Therefore, in this study, solar ultraviolet radiation for psoriasis heliotherapy at a site in Thailand was first investigated to reveal its diurnal and seasonal variations and efficiency in the therapy. A spectroradiometer (DMc150) installed at Silpakorn University, Nakhon Pathom province (13.82 °N, 100.04 °E) was used to measure spectral irradiance and converted to anti-psoriasis irradiance. This irradiance was calculated to obtain the monthly average hourly anti-psoriasis ultraviolet radiation data (2016-2018). The result showed the diurnal and seasonal variations of the anti-psoriasis ultraviolet radiation. The values are relatively high from 10 a.m. to 2 p.m., especially between March and October, and relatively low from November to February. The maximum monthly average hourly values in the summer, rainy, and winter seasons were 77.6, 76.9, and 52.4 mJ/cm². In addition, an empirical model for estimating the anti-psoriasis ultraviolet radiation dose was first generated as a linear regression by using the UV index, which is a broader

measurement. The difference between the data obtained from the model and the measurement is in good agreement with root mean square difference (RMSD) and mean bias difference (MBD) were 12.9% and 1.0%, respectively.

INTRODUCTION

Solar radiation can be divided into three bands, namely, ultraviolet radiation (UV, 280-400 nm), visible light (VIS, 400-700 nm), and near-infrared (NIR, 700-4000 nm). The UV itself can be separated depending on environmental and biological effects, called UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm), and UV-C (100-280 nm) [1]. Generally, UV-C cannot penetrate the atmosphere to the earth's surface as it is absorbed by atmospheric constitutions such as oxygen and ozone in the upper atmosphere [2]. Therefore, only UV-A and UV-B reach the earth's surface, and this radiation is only a small portion of the solar radiation [3-4].

UV ranges mainly cause DNA damage to lipid and protein oxidation, which makes clinically seen as tanning for a short-term effect of UV-A, aging, and skin cancers, the long-term during sunburn for the short-term effect of UV-B. Uneven skin color and cataracts are also negative consequences of chronic exposure to a full spectrum of solar radiation [5]. Despite the potential adverse effects of full-spectrum sun exposure, some narrow UV ranges (297-313 nm) can also enormously benefit the living, including the primary source of vitamin D synthesis through the skin. Vitamin D regulates immunity and calcium-phosphorus metabolism, enabling normal bone and muscle function mineralization. This

does not only have positive effects on physical health but also on mood balance by providing a sense of security. The narrow-band UV-B's immunosuppressive or anti-inflammatory effects can improve or even clear the lesions of many inflammatory skin diseases. These include psoriasis, vitiligo, and the early stage of cutaneous T-cell lymphoma, making patients with inflammatory sun allergy conditions more tolerant of the sun [6].

UV Phototherapy using artificial light sources is one of the standard treatments for various skin conditions [7]. Phototherapy can also be applied safely to a wide-ranging group of patients. Typical hospital-based phototherapy cabinets contain a bunch of artificial lamps, either broadband (primary emission spectrum 280 – 360 nm, maximum at 320 nm) or narrow-band UV-B irradiation (primary emission spectrum 310-315 nm, maximum at 311 nm) following the well-established knowledge of the most anti-psoriasis effective UV ranges from 304 to 313 nm [8-9]. With national guidelines and standard dosimetry protocols, hospital-based phototherapy equipment provides precisely given safe and effective doses. In Thailand, the number of phototherapy centers and shortage of qualified phototherapy practitioners is limited, and financial concerns for at least twenty treatment sessions are required to see the outcomes [10]. Therefore, natural sunlight treatment is an alternative option. The patients do not need to

access phototherapy centers often, reducing traveling and treatment costs and spending time. Phototherapy using natural sunlight has been clinically beneficial since the 1890s for a great diversity of health issues [11-13], including skin conditions [14-16]. There have been several clinical studies of successful supervised ambient sunbathing alone, heliotherapy, however, only in limited regions, mostly from European countries, including the Canary Islands, Spain [17], Helsinki Finland, and Davos, Switzerland [18-23]. One of the most important heliotherapy issues in those countries is inconsistent UV radiation throughout the year. Daily variations in the most suitable spring and summer times for heliotherapy can also be challenging. The key determinants are successfully giving a safe and effective natural sunlight treatment, consistent solar radiation, accurate data of the incident solar spectrum, and dosimetry at a particular location and time. A study of solar UV radiation in Thailand showed that the country generally has sufficient UV radiation despite seasonal variations [24-26].

Apart from heliotherapy, there are several options for skin treatment, e.g., pill or topical therapy. The topical therapy is recommended for mild skin disease, and pill treatment may have side effects. Additionally, heliotherapy in Thailand is seemingly promising as a systemic treatment alternative where patients effortlessly receive sunbathing treatments from their homes whenever they are convenient.

In Thailand, there is no report on UV data for psoriasis treatment. Therefore, this study aims

to investigate the natural UV sunlight for the psoriasis treatment at a study site in Nakhon Pathom, the central region of Thailand, where the measurement is available. The diurnal and seasonal variations of the UV dose were analyzed using three years of data covering 1 January 2016 to 31 December 2018. In addition, as the lack of UV data for the psoriasis treatment, an empirical model to estimate the UV dose for psoriasis treatment from the UV index data, a broader measurement, was first developed and validated in this work.

MATERIALS AND METHODS

A spectroradiometer (Bentham Instrument, model DMc150) installed at Silpakorn University, Nakhon Pathom province (13.82 °N, 100.04 °E, 39.4 msl), was used to measure solar spectral irradiance covering the wavelength of 260-420 nm with the spectral resolution of 1 nm. The pictorial view of the instrument is presented in Figure 1.

The input optics is located on a rooftop of the science building of Silpakorn University. These input optics are connected to the double monochromator, the photomultiplier, and the detector. The electronic signals from the detector were transferred and displayed on a processing computer, and Benwin+ software was installed on the processing computer to control the system and for the data acquisition. This instrument was calibrated using a deuterium standard lamp once per month.



Figure 1 A pictorial view of the spectroradiometer installed at Nakhon Pathom a) input optics
 b) the monochromator and detector

To obtain the UV data responding to psoriasis treatment, the current signals recorded in the processing computer every ten minutes were converted to spectral irradiance using its sensitivity retrieved from the calibration. This spectral irradiance was converted to effective doses for the anti-psoriatic effect of ultraviolet radiation using the following expression.

$$\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR}}(t_2, t_1) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{280\text{nm}}^{400\text{nm}} I_{\lambda}(t, \lambda) R_{\lambda} d\lambda \right) dt \quad (1)$$

where $\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR}}$ is an anti-psoriasis-weighted dose in the period t_1 to t_2 , $I_{\lambda}(t, \lambda)$ is spectral irradiance at time t and wavelength λ , and R_{λ} is

anti-psoriasis action spectrum function.

The anti-psoriasis action spectra are defined as follows Krzyscin et al. [10]:

$$R_{\lambda} = \begin{cases} 0.6504 \times 10^{-0.6304(296-\lambda)} & \lambda < 296 \text{ nm} \\ 1.0000 \times 10^{-0.0467(300-\lambda)} & 296 \leq \lambda < 300 \text{ nm} \\ 1.0000 \times 10^{-0.1067(\lambda-300)} & 300 \leq \lambda < 304 \text{ nm} \\ 0.3743 \times 10^{-0.1571(\lambda-304)} & 304 \leq \lambda < 313 \text{ nm} \\ 0.0144 \times 10^{0.08233(313-\lambda)} & 313 \leq \lambda < 330 \text{ nm} \\ 0.0057 \times 10^{0.00937(330-\lambda)} & 330 \leq \lambda < 400 \text{ nm} \end{cases} \quad (2)$$

An example of the spectral irradiance and anti-psoriasis action function is presented in Figure 2, which can be seen that the most effective spectral irradiance for anti-psoriasis is in the UV-B wavelength.

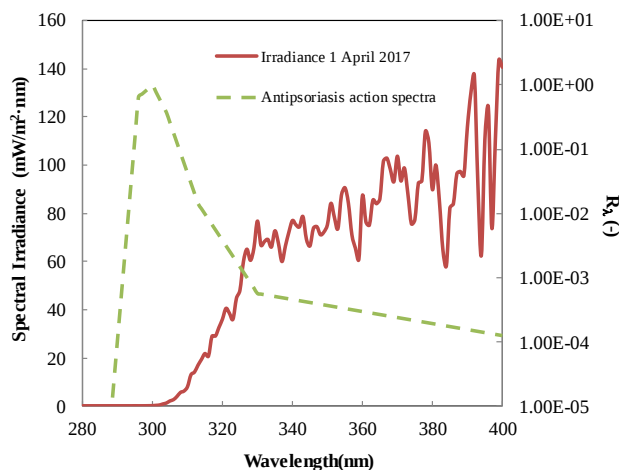


Figure 2 An example of spectral UV irradiance at a given time on 1 April 2017 at 8 a. m. and the anti-psoriasis action spectra (R_{λ})

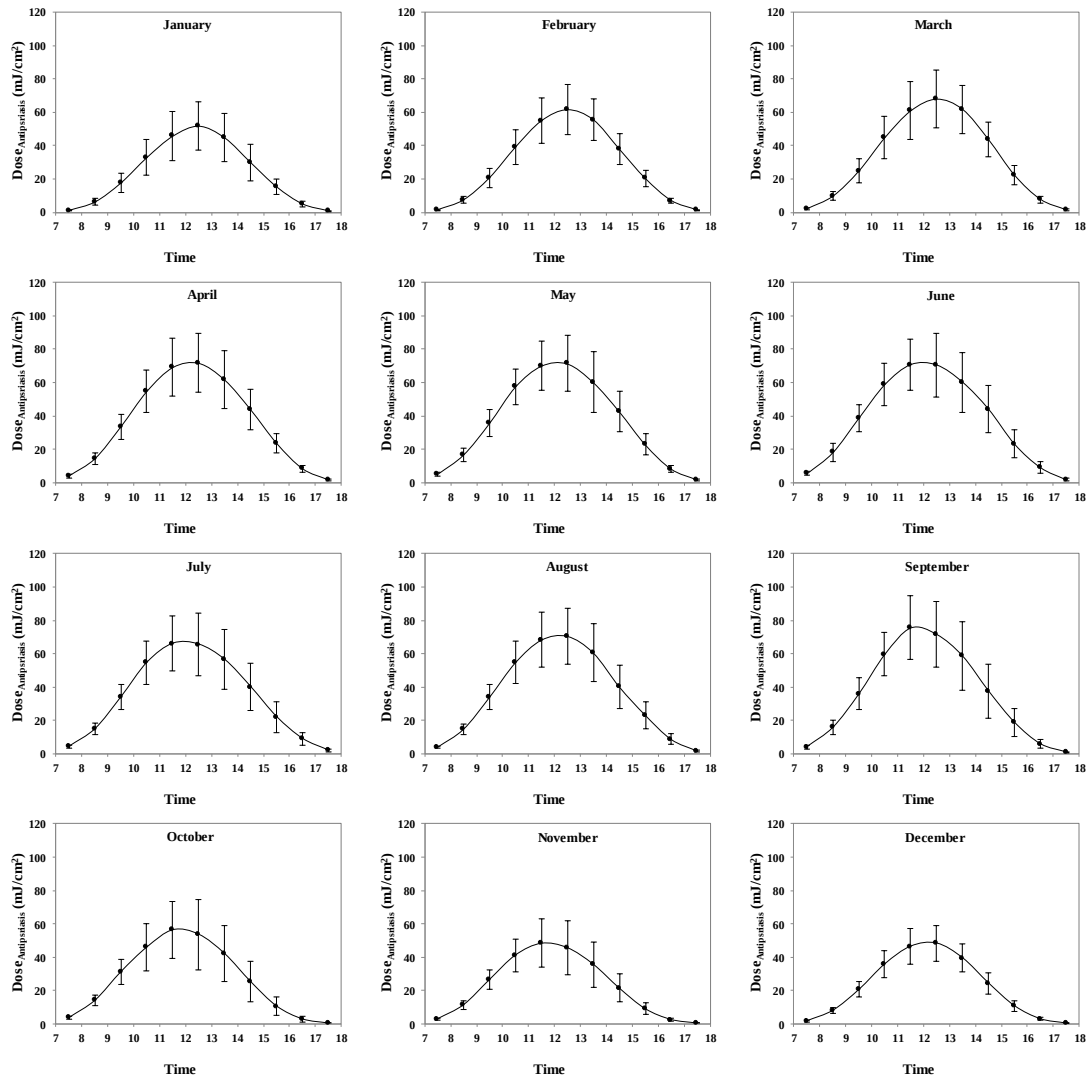


Figure 3 The diurnal variation of anti-psoriasis UV doses at Nakhon Pathom during 2016-2018

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the anti-psoriasis weighted doses retrieved from the spectroradiometer were used for three years, from 1 January 2016 to 31 December 2018. The dose within an hour was obtained from 7 a.m. to 6 p.m. At each month, the hourly anti-psoriasis UV doses at the same period were averaged to obtain monthly average hourly data and then plotted against the local time to investigate the diurnal

variation. For the seasonal variation analysis, the monthly data were plotted against the month for each period.

The diurnal variation

The diurnal variation of the anti-psoriasis UV doses averaged during 2016-2018 are presented in Figure 3. The results indicate that the UV doses increase from the early morning to reach the maximum value during noontime and decrease until evening. This is

mainly influenced by the position of the sun. In the morning and evening, the sun is relatively low, and thus path length of solar radiation in the atmosphere is relatively large compared to the noontime. As a result, the maximum anti-psoriasis UV doses are 77.6, 76.9, and 52.4 mJ/cm² in the summer (February-May), rainy (June-October), and winter (November-January) seasons, respectively.

Seasonal variation

The seasonal variation of the hourly anti-psoriasis UV dose averaged during 2016-2018 is shown in Figure 4 from 7 a.m. to 6 p.m. In addition, the threshold dose (i.e., 45 mJ/cm²) used for the treatment of psoriasis proposed by Krzyscin et al. [10] was also drawn in the figures to present the potential of the solar UV dose for the psoriasis treatment in Thailand.

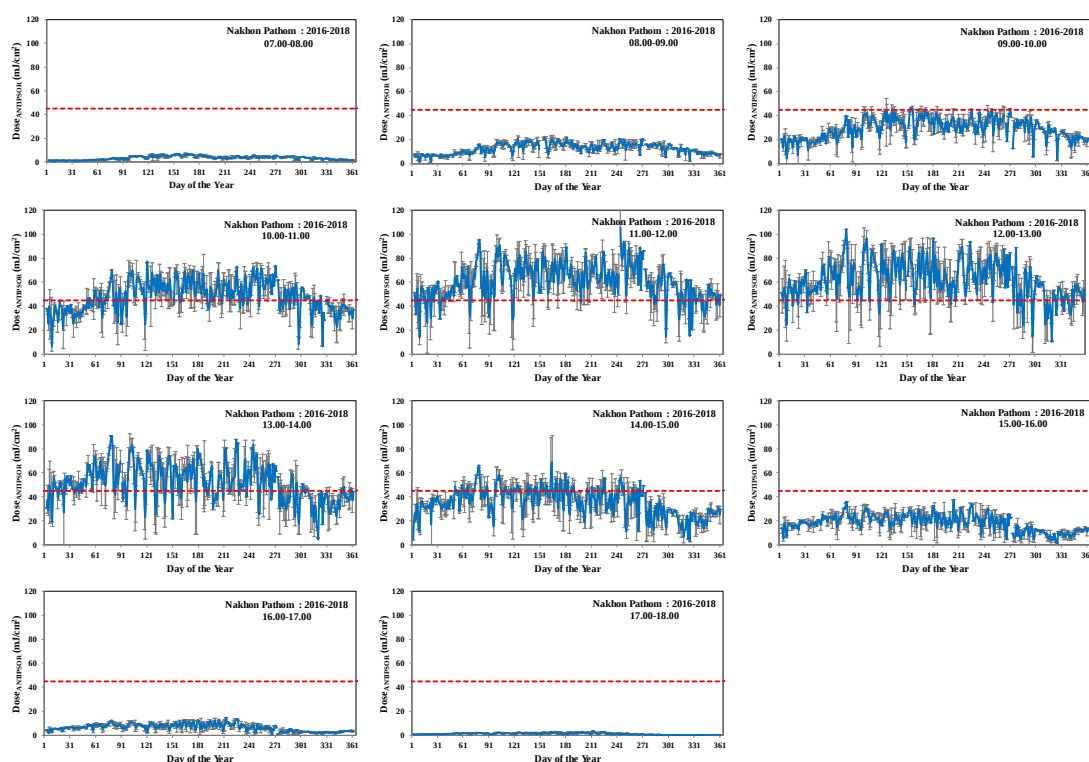


Figure 4 The seasonal variation of hourly anti-psoriasis UV doses from 7 a.m. to 6 p.m. at Nakhon Pathom (The red dash line indicates the threshold of UV dose for the treatment)

The results show seasonal variation in which the anti-psoriasis UV doses are relatively high from March to October and relatively low from November to February. This is mainly because of the position of the sun in the sky. The solar zenith angle is relatively high from March to October, resulting in small solar path length and

solar extinction [25-27]. In addition, the figure represents that the potential periods to treat psoriasis using sunlight within 1 hour are from 10 a.m. - 2 p.m. from March to October when the value of UV dose is above the threshold value. However, patients can exposure the sun at other times for a longer period depending on the

direction of their dermatologists. It is noted that the threshold used in this work was defined in Krzyscin et al. [10] for mid-latitude at San Diego (32.77°N, 117.20°W) and high-latitude at Belsk (51.83°N, 20.78°E), which may not perfectly suit for Thailand. This threshold then should be further justified for low-latitude as Thailand. Moreover, excessive exposure is harmful. Therefore, the optimal exposure time for psoriasis treatment should not exceed the time leading to hazardous health [28].

The empirical model

According to the limitation of the ground-based spectroradiometer, they can be used to measure the UV doses to treat psoriasis. In contrast, UV index (UVI) has been measured broadly. Therefore, a simple model used to estimate the anti-psoriasis UV doses is needed. In this study, an empirical model was developed and validated. UVI was calculated following the method in [29] using the DMc150 spectroradiometer at the same site. Then hourly anti-psoriasis UV dose was plotted against the UV index using 2016 and 2017. The graph between the anti-psoriasis UV dose and the UV index is shown in Figure 5, and the linear least square expression can be written as follows:

$$\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR}} = 6.5713\text{UVI} \quad (3)$$

$\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR}}$ is the anti-psoriasis UV dose (mJ/cm^2), and UVI is the UV index (unitless).

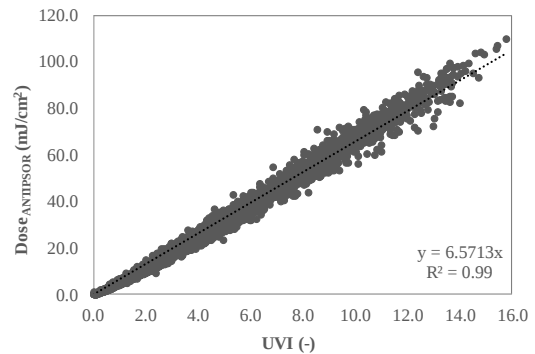


Figure 5 The relationship between anti-psoriasis UV dose ($\text{Dose}_{\text{psoriasis}}$) and UV index (UVI) in 2016 and 2017

For the model validation, the anti-psoriasis UV doses calculated from the proposed model were compared with those measured from the spectroradiometer in 2018. The validation result presented in Figure 6 shows that the model can estimate the anti-psoriasis reasonably compared to a method in Krzyscin et al. [30] that used the satellite data approach.

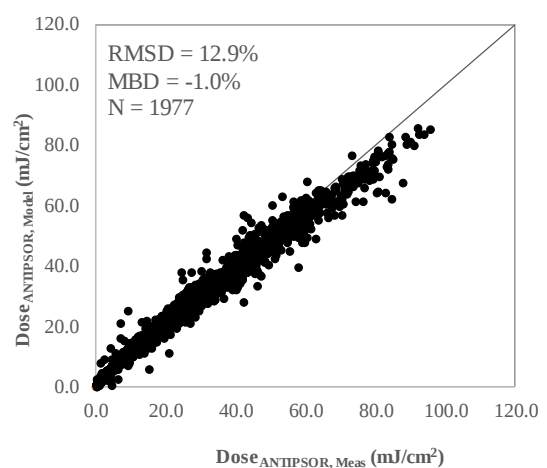


Figure 6 The comparison between the anti-psoriasis UV dose from the model ($\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR, Model}}$) and the measurement ($\text{Dose}_{\text{ANTIPSOR, Meas}}$)

CONCLUSION

The anti-psoriasis effective UV dose at Nakhon Pathom was investigated. The results show that the UV dose was diurnal and seasonal variations and relatively high from 10 a.m. to 2 p.m., especially between March and October. Therefore, this period is likely to have the potential for treating psoriasis and several inflammatory skin conditions. However, the UV doses in other regions may differ depending on the location, geography, and atmospheric conditions. Therefore, the UV dose in other regions of Thailand should be further investigated for the extended development of a national heliotherapy protocol for psoriasis in Thailand. In Thailand, Heliotherapy using a sustainable abundance of solar energy would transform medical practice on light-based treatments, which is considered enormously beneficial but time-consuming and required commitment into perhaps one of the supervised primary aids at home.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Faculty of Sciences, Silpakorn University, for the financial support (Grant number SRF-JGR-2561-03) (to SB) and the Royal College of Physicians of Thailand (to EB). We gratefully acknowledge undergraduate senior project students of the Department of Physics, Silpakorn University, for their help processing data, and staff of the Photodermatology Unit, Division of Dermatology, Department of Medicine, Chulalongkorn University

for assistance on medical service perspectives of psoriasis treatment.

REFERENCES

1. Diffey BL. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*. 2002;28(1):4-13.
2. Foyo-Moreno I, Manzano VJ, Arboledas L. Ground based ultraviolet (290–385 nm) and broadband solar radiation measurements in South-Eastern Spain. *Int J climatol*. 1998;18: 1389-400.
3. Srisawang N, Ngerchuklin P, Chaiyasat A, Chaiyasat P. [Polymer microcapsules encapsulating photocatalyst nanoparticles for dye treatment in wastewater]. *JARST* [Internet]. 2020 Aug. 5 [cited 2022 Apr. 22];19(2):1-16. Available from: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutt-journal/article/view/240553>. Thai
4. Rivas M, Calaf GM, Laroze D, Rojas E, Mendez J, Honeyman J, Araya MC. Solar ultraviolet A radiation and nonmelanoma skin cancer in Arica, Chile, *J Photochem Photobiol B, Biol*. 2020;212:1011-1344.
5. Ohnaka T. Health effects of ultraviolet radiation. *Ann Physiol Anthropol*. 1993;12(1): 1-10.
6. Feister U, Laschewski G, Grewe RD. UV index forecasts and measurements of health-effective radiation. *J Photochem Photobiol B, Biol*. 2011;102(1):55-68.

7. Elmetts CA, Lim HW, Stoff B, Connor C, Cordoro KM, Lebwohl M, et al. Joint American Academy of Dermatology–National Psoriasis Foundation guidelines of care for the management and treatment of psoriasis with phototherapy. *J Am Acad Dermatol*. 2019;81(3):775-804.
8. Chen X, Yang M, Cheng Y, Liu GJ, Zhang M. Narrow- band ultraviolet B phototherapy versus broadband ultraviolet B or psoralen-ultraviolet A photochemotherapy for psoriasis. *Cochrane Database Syst Rev*. 2013;10:CD009481.
9. Almutawa F, Alnomair N, Wang Y, Hamzavi I, Lim HW. Systematic review of UV-based therapy for psoriasis. *Am J Clin Dermatol*. 2013;14(2):87-109.
10. Krzyscin JW, Jarosławski J, Rajewska-Wiech B, Sobolewski PS, Narbutt J, Lesiak A, et al. Effectiveness of heliotherapy for psoriasis clearance in low and mid-latitudinal regions: a theoretical approach. *J Photochem Photobiol B, Biol*. 2012;115:35–41.
11. Gardiner CF. Heliotherapy in Colorado. *Trans Am Climatol Clin Assoc*. 1915;31:184-91.
12. Metzger J. The clinical application of heliotherapy. *Trans Am Climatol Clin Assoc*. 1926;42:132-8.
13. Alpert JS. The Jeremiah Metzger lecture: Jeremiah Metzger and the era of heliotherapy. *Trans Am Climatol Clin Assoc*. 2015;126:219-26.
14. Buchholz W. Heliotherapy of psoriasis. *Z Haut Geschlechtskr*. 1969;44(1):13-6.
15. Körbler J. To the history of development of heliotherapy. *Hippokrates*. 1967;38(4):145-50.
16. Linser K, Harnack K. Heliotherapy of mycosis fungoides. *Clin Exp Dermatol*. 1962;215:181-201.
17. Nilsen L, Søyland E, Krogstad, AL. Estimated UV doses to psoriasis patients during climate therapy at Gran Canaria in March 2006. *Atmos Chem Phys Discuss*. 2008;8:1-19.
18. Snellman E. Comparison of the anti-psoriatic efficacy of heliotherapy and ultraviolet B: a cross-over study. *Photodermatol Photoimmunol Photomed*. 1992;9(2):83-5.
19. Snellman E, Jansen, CT, Lauharanta J, Kolari P. Solar ultraviolet (UV) radiation and UV doses received by patients during four-week climate therapy periods in the Canary Islands. *Photodermatol Photoimmunol Photomed*. 1992;9(1):40-3.
20. Snellman E, Aromaa A, Jansén CT, Lauharanta J, Reunanen A, Jyrkinen-Pakkasvirta T, et al. Supervised four-week heliotherapy alleviates the long-term course of psoriasis. *Acta Derm Venereol*. 1993;73(5):388-92.
21. Snellman E, Lauharanta J, Reunanen A, Jansén CT, Jyrkinen-Pakkasvirta T, Kallio M, et al. Effect of heliotherapy on skin and joint symptoms in psoriasis: a 6-month follow-up study. *Br J Dermatol*. 1993;128(2):172-7.

22. Kanayama H, Kusaka Y, Hirai T, Inoue H, Agishi Y, Schuh A. Climatotherapy in Japan: a pilot study. *Int J Biometeorol*. 2017;61(12):2141-3.
23. Takada Y, Irisawa K, Kawada A. Heliotherapy of pityriasis lichenoides chronica. *J Dermatol*. 1977;4(3):91-4.
24. Raksasat R, Sri-lesaranusorn P, Pemcharoen J, Laiwarin P, Buntoung S, Janjai S, et al. Accurate surface ultraviolet radiation forecasting for clinical applications with deep neural network. *Sci Rep*. 2021;11(1):5031.
25. Janjai S, Buntoung S, Masiri I, Wattan R. Mapping solar ultraviolet radiation from satellite data in a tropical environment. *Remote Sens Environ*. 2010;114(3):682-91.
26. Janjai S, Kirdsiri K, Masiri I, Nunez M. An investigation of solar erythemat ultraviolet radiation in the tropics: a case study at four stations in Thailand. *Int J Climatol*. 2010;30: 1893-903.
27. Iqbal M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press; 1983.
28. Miyauchi M, Nakajima H. Determining an Effective UV Radiation Exposure Time for Vitamin D Synthesis in the Skin Without Risk to Health: Simplified Estimations from UV Observations. *Photochem Photobiol*. 2016; 92(6):863-869.
29. World Health Organization (WHO), World Meteorological Organization (WMO). United Nations Environment Programme (UNEP), International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Global Solar UV Index: A Practical Guide, Watch No 95, WMO/ TD No. 625, Geneva, Switzerland. 2002.
30. Krzyscin JW, Guzikowski J, Czerwinska A, Lesiak A, Narbutt J, Jarosławski J, et al. 24 hour forecast of the surface UV for the antipsoriatic heliotherapy in Poland. *J Photochem Photobiol B, Biol*. 2015;148:136-44.



การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศ: กรณีศึกษาพลังงานทางเลือกก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรี

Comparison of Methods for Analysis of the Air Quality: A Case Study of Alternative Energy for Biogas in Suphanburi Province

พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง*

Pimpan Amphanthong*

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Samchuk, Suphanburi 72130, THAILAND

*Corresponding author e-mail: amphanthongpim@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: December 20, 2021

Revised: April 25, 2022

Accepted: May 5, 2022

Available online: June 7, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.5

Keywords: box-Jenkins method, forecast, biogas, air quality

This research examines the comparison of 96 monthly air quality data from biogas alternative energy in Suphan-Buri province for a total of 8 years from January 2010 to December 2017. By dividing the biogas composition data for analysis to the research objectives by dividing the data into two sets; namely the first set of data to create a model for forecasting trends in air quality to find suitability and the second set of information to compare the performance of air quality forecasting. The air quality forecasting using four time-series data forecasting methods; namely the Box-Jenkins Method (BJ), the Holt's Exponential Smoothing Method (Holt), the smoothing method with Brown's Exponential Smoothing Method (Brown) and the Damped trend exponential smoothing method (Damped). The composition of biogas is separated into 3 types of gases, namely methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2) and hydrogen sulfide (H_2S) to determine the suitability of the forecast model. The results of the forecast model study by comparing the root mean square errors (RMSE) showed that the

Damped method was suitable for CH_4 gas, the BJ method was suitable for CO_2 gas, and the Holt method was suitable for H_2S gas, respectively. The resulting model was then used to find future forecast values. It was found that the Damped method was able to generate a CH_4 gas data forecast model that was closest to the true value.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศรายเดือนจากพลังงานทางเลือกก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรีรวมเวลา 8 ปี ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 จำนวน 96 ค่า โดยนำข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมาแบ่งการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยโดยแบ่งข้อมูลออกเป็นสองชุด ได้แก่ ข้อมูลชุดแรก เพื่อนำไปสร้างตัวแบบพยากรณ์แนวโน้มคุณภาพอากาศเพื่อหาความเหมาะสมและข้อมูลชุดสองเพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์คุณภาพอากาศด้วยวิธีพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาทั้ง 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method: BJ) วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt's Exponential Smoothing Method: Holt) วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown's Exponential Smoothing Method : Brown) และวิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังแบบแนวโน้มของแดม (Damped Trend Exponential Smoothing Method Damped: Damped) โดยพิจารณาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพแยกเป็นก๊าซทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน (Methane: CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide: H_2S) เพื่อหาความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ของก๊าซทั้งสามชนิด ผลการศึกษาตัวแบบการพยากรณ์ด้วยการเปรียบเทียบค่ารากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Errors: RMSE) พบว่า วิธี Damped เหมาะสมกับก๊าซ CH_4 วิธี BJ เหมาะสมกับก๊าซ CO_2

และวิธี Holt เหมาะสมกับก๊าซ H_2S ตามลำดับ จากนั้นได้นำตัวแบบที่ได้ไปหาค่าพยากรณ์ในอนาคต พบว่าวิธี Damped สามารถสร้างตัวแบบอนุกรมเวลาข้อมูลก๊าซ CH_4 ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

คำสำคัญ: วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ การพยากรณ์ ก๊าซชีวภาพ คุณภาพอากาศ

บทนำ

จังหวัดสุพรรณบุรีมีแม่น้ำท่าจีนไหลผ่านเหมาะกับการทำนาและเพาะปลูก พื้นที่บางส่วนเป็นป่าไม้และภูเขาทำให้อากาศอากาศชุ่มชื้น อากาศดีและบริสุทธิ์มาตั้งแต่ในอดีต แต่ปัจจุบันพบว่าสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยพบเห็นจากปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ค่าตะกั่ว ค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกไซด์ มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นทั้งนี้เกิดจากมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น ไอเสียที่ปล่อยออกมาจากยานพาหนะ การเผาในที่โล่ง การใช้พินถ่านในการหุงต้ม ควันธูป รวมทั้งกิจการโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งพลังงานที่ก่อกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นพลังงานทางเลือกที่ไม่มีระบบควบคุมคุณภาพทางอากาศ เป็นต้น จากปัญหาสภาวะฝุ่นละออง PM 2.5 ในอากาศสะสมเกินค่ามาตรฐาน ส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชาชน สัตว์ และพืชพันธุ์ต่าง ๆ หากสะสมมาก ๆ ก็จะทำให้ป่วยและเสียชีวิตได้ จากประเด็นเรื่องคุณภาพอากาศนี้ พบว่าในจังหวัดสุพรรณบุรีได้มีการรณรงค์ ประชาสัมพันธ์และนำข้อมูลข่าวสารการรั่วสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ชุมชนเพื่อให้ตระหนักถึงความสำคัญของสิ่งแวดล้อม ลดการเผาไหม้ ห้ามจุดไฟเผาป่าและ

วัชพืช อีกทั้งรณรงค์การใส่หน้ากากเพื่อป้องกันภัยฝุ่นอีกทางหนึ่งด้วย

จากสภาพปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศในจังหวัดสุพรรณบุรีโดยตรง แต่พบว่าอีกสาเหตุหนึ่งของปัญหาที่ยังไม่มีการสำรวจเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกโดยเฉพาะการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพว่าได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศหรือไม่ ทั้งนี้เพราะการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดจากระบวนการผลิต 5 รูปแบบ คือ มูลสัตว์ น้ำเสีย อุตสาหกรรม ขยะชุมชน เชื้อเพลิงชีวภาพของเหลวและของแข็ง เป็นต้น และกระบวนการก๊าซชีวภาพก่อให้เกิดการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตและของเสียจากสัตว์รวมถึงขยะอินทรีย์มาจากการทำงานของจุลินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ แสดงสัดส่วนขององค์ประกอบของก๊าซได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซ	สัดส่วน (%)
ก๊าซมีเทน	60-70
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	28-38
ก๊าซอื่น ๆ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนียและไอน้ำ	2

จากข้อสังเกตนี้ทำให้น่าสนใจว่าถ้ามีการนำข้อมูลองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซ CH_4 , ก๊าซ CO_2 และก๊าซ H_2S มาสร้างตัวแบบพยากรณ์คุณภาพอากาศเพื่อใช้พยากรณ์เปรียบเทียบแนวโน้มข้อมูลคุณภาพอากาศในจังหวัดสุพรรณบุรีในอนาคต ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์คุณภาพอากาศจากก๊าซชีวภาพพร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยวิธีต่างๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในจังหวัดสุพรรณบุรีได้ โดยเก็บข้อมูลรายเดือนของพลังงานทางเลือกก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรีตลอดระยะเวลา 8 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2560 โดยใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาจำนวน 4 วิธี

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์ปริมาณก๊าซในอนาคต แนวโน้ม ทิศทางและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความแม่นยำตัวแบบการพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ตัวแบบรากที่สองค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) และเปอร์เซ็นต์ค่าสัมบูรณ์คลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ในการแสดงค่าประสิทธิภาพของผลพยากรณ์

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการพยากรณ์คุณภาพอากาศที่เกิดจากพลังงานทางเลือก กรณีศึกษาก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรี เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศจากทั้ง 4 วิธีที่ใช้วิเคราะห์คุณภาพอากาศที่เกิดจากการเก็บข้อมูลในพื้นที่จังหวัด โดยใช้เครื่องมือการตรวจวัดแยกก๊าซของโรงงานผลิตก๊าซ เก็บรวบรวมข้อมูลรายเดือนของก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลา 8 ปี ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 จำนวน 96 ค่า จากนั้นแยกพิจารณาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ พบว่าแยกเป็นก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซ CH_4 ก๊าซ CO_2 และก๊าซ H_2S เพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์ขององค์ประกอบก๊าซทั้งสามชนิด จากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มาแยกเป็นสองชุด คือ ข้อมูลชุดแรก เพื่อนำไปสร้างตัวแบบพยากรณ์แนวโน้มคุณภาพอากาศจากก๊าซชีวภาพตามความเหมาะสมกับอนุกรมเวลากับวิธีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์คุณภาพอากาศทั้ง 4 วิธี ได้แก่ วิธี BJ, วิธี Holt, วิธี Brown และวิธี Damped โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2559 จำนวน 84 ข้อมูล และข้อมูลชุดสอง เพื่อนำมาทดสอบหาค่าประสิทธิภาพตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 4 วิธี โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 จำนวน 12 ข้อมูล ดังนั้นการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาจะมีลักษณะที่พิจารณา คือ การมีแนวโน้มวัฏจักรหรือฤดูกาลที่ชัดเจนเพื่อที่จะกำหนดรูปแบบที่เหมาะสม

ซึ่งถ้าข้อมูลไม่มีลักษณะดังกล่าวยากที่จะกำหนดรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม การพยากรณ์เปรียบเทียบข้อมูลอนุกรมเวลาเหนือการพยากรณ์ของงานวิจัยที่ผ่านมา [1-5] แสดงการพยากรณ์ที่เหมาะสมจำนวน 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method) วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt's Exponential Smoothing Method) วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown's Exponential Smoothing Method) และวิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังแบบแนวโน้มของแดม (Damped Trend Exponential Smoothing Method) มีรายละเอียดของการพยากรณ์แต่ละวิธี ดังนี้

1. วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (BJ) เป็นวิธีพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความแม่นยำ สามารถใช้แก้ปัญหาการกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ มีการสร้างเป็นตัวแบบวิเคราะห์ที่เหมาะสมและคำนึงถึงความผันแปรตามฤดูกาลเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ [4] การพยากรณ์ของวิธี BJ เรียกว่า "SARIMA(p, d, q) (P, D, Q)s" (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average:) ดังสมการ (1) นี้

$$\begin{aligned} & \left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right) (1 - B)^d \\ & \left(1 - \sum_{i=1}^P \Phi_i B^{is}\right) (1 - B^s)^D Z_t \\ & = c + \left(1 - \sum_{j=1}^q \theta_j B^j\right) \left(1 - \sum_{j=1}^Q \Theta_j B^{js}\right) E_t \quad (1) \end{aligned}$$

โดยที่ $\left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right) (1 - B)^d$ = ค่าสหสัมพันธ์แบบไม่มีฤดูกาลอันดับที่ p : AR(p),

$\left(1 - \sum_{i=1}^P \Phi_i B^{is}\right) (1 - B^s)^D$ = ค่าสหสัมพันธ์แบบมีฤดูกาลอันดับที่ P: SAR(P),

Z_t แทนข้อมูลอนุกรมเวลา ณ เวลา t,

c แทนค่าคงที่ นั่นคือ

$$\mu \left(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i\right) \left(1 - \sum_{i=1}^P \Phi_i B^{is}\right),$$

μ แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลอนุกรมคงที่,

$$\left(1 - \sum_{j=1}^q \theta_j B^j\right) \text{ แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบไม่มี}$$

ฤดูกาลอันดับที่ q,

$$\left(1 - \sum_{j=1}^Q \Theta_j B^{js}\right) \text{ แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบมี}$$

ฤดูกาลอันดับที่ Q,

E_t แทนข้อมูลอนุกรมของค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t ,

t แทนเวลาซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่แบ่งเวลาออกเป็นสองช่วง คือ n_1 แทนจำนวนข้อมูลอนุกรมในชุดแรก และ n_2 แทนจำนวนข้อมูลอนุกรมชุดสอง

S แทนจำนวนฤดูกาล,

d และ D แทนการหาผลต่างลำดับที่และฤดูกาลและ B แทนการหาค่าดำเนินการถอยหลังโดยที่ $B^S Z_t = Z_{t-s}$

2. วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt) เป็นวิธีพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไม่มีควมผันแปรตามฤดูกาล มีค่าคงตัวการทำให้เรียบ 2 ตัว คือ ค่าคงตัวการทำให้เรียบของค่าระดับ (Level: λ) และค่าคงตัวการทำให้เรียบของค่าความชัน (Trend: δ) ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (2)

$$\text{ตัวแบบ: } Z_t = \beta_0 + \beta_1 t + E_t,$$

$$\text{ตัวแบบพยากรณ์: } \hat{Z}_{t+m} = a_t + b_t(m) \quad (2)$$

เมื่อ Z_t แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t

β_0 และ β_1 แทนค่าคงที่ของสมการแสดงระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้ม ตามลำดับ

E_t แทนข้อมูลอนุกรมของค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

$\hat{Z}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

a_t และ b_t แทนค่าประมาณ ณ เวลา t ของพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

โดยที่ $a_t = \lambda Z_t + (1 - \lambda)(a_{t-1} + b_{t-1})$ และ $b_t = \delta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \delta)b_{t-1}$

λ และ δ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่ $0 < \lambda < 1$ และ $0 < \delta < 1$

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดแรก

3. วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown) เป็นวิธีพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาลักษณะเดียวกับวิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ มีการกำหนดให้ค่าคงที่ของระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้มเท่ากัน ตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (3)

ตัวแบบ: $Z_t = \beta_0 + \beta_1 t + E_t$

ตัวแบบพยากรณ์: $\hat{Z}_{t+m} = a_t + b_t \left[m - 1 + \frac{1}{\lambda} \right]$ (3)

เมื่อ Z_t แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t

β_0 และ β_1 แทนค่าคงที่ของสมการแสดงระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้ม ตามลำดับ

E_t แทนข้อมูลอนุกรมของค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

$\hat{Z}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

a_t และ b_t แทนค่าประมาณ ณ เวลา t ของพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

โดยที่ $a_t = \lambda Z_t + (1 - \lambda)(a_{t-1} + b_{t-1})$ และ $b_t = \delta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \delta)b_{t-1}$

λ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่

$0 < \lambda < 1$

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดแรก

4. วิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังแบบแนวโน้มของแดม (Damped) เป็นวิธีพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาลักษณะเดียวกับวิธีปรับเรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ การกำหนดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้มตามเวลาตัวแบบและตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (4) งานวิจัยของ Ket-iam [3]

ตัวแบบ: $Z_t = \beta_0 + \beta_1 t + E_t$,

ตัวแบบพยากรณ์: $\hat{Z}_{t+m} = a_t + b_t \sum_{i=1}^m \phi^i$ (4)

เมื่อ Z_t แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t

β_0 และ β_1 แทนค่าคงที่ของสมการแสดงระยะตัดแกนและความชันของแนวโน้ม ตามลำดับ

E_t แทนข้อมูลอนุกรมของค่าความคลาดเคลื่อน ณ เวลา t

$\hat{Z}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

a_t และ b_t แทนค่าประมาณ ณ เวลา t ของพารามิเตอร์ β_0 และ β_1 ตามลำดับ

โดยที่ $a_t = \lambda Z_t + (1 - \lambda)(a_{t-1} + \phi b_{t-1})$ และ $b_t = \delta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \delta)\phi b_{t-1}$

λ , δ และ ϕ แทนค่าคงตัวการทำให้เรียบ โดยที่ $0 < \lambda < 1$, $0 < \delta < 1$ และ $0 < \phi < 1$

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 โดยที่ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดแรก

วิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาสามารถแก้ปัญหาการกำหนดรูปแบบที่แน่นอนได้ด้วยทำการวิเคราะห์ก่อน โดยระหว่างการทำวิเคราะห์รูปแบบจะถูกกำหนดขึ้นมาเอง มีขั้นตอน ดังนี้

1. การคำนวณค่าของฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation Function: ACF) และฟังก์ชันสหสัมพันธ์บางส่วน (Partial Autocorrelation Function: PACF) สำหรับการวิเคราะห์อนุกรมเวลาที่คงที่ เพื่อกำหนดรูปแบบอนุกรมคงที่ระหว่าง ค่าฟังก์ชัน ACF และค่าฟังก์ชัน PACF ด้วยการกำหนดค่า p , q , P และ Q พร้อมทั้งประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

2. การวิเคราะห์ข้อมูลค่าฟังก์ชัน ACF และค่าฟังก์ชัน PACF ของผลต่างข้อมูลอนุกรมนั้น ๆ ด้วยการตรวจสอบความถูกต้องจากการตัดค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญออกจากตัวแบบพยากรณ์ครั้งละ 1 ตัว โดยถ้าพารามิเตอร์ของอันดับที่ต่ำกว่าไม่มีนัยสำคัญ ถ้าผลการตรวจสอบปรากฏว่า ตัวแบบไม่มีความเหมาะสมจะกลับไปเลือกตัวแบบพยากรณ์ใหม่

3. การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์จะพิจารณาค่าต่ำสุดของค่า RMSE และค่า MAPE เพราะให้ความแม่นยำสูง

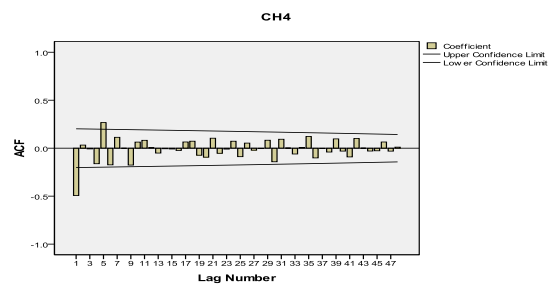
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศขององค์ประกอบของก๊าซทั้งสามชนิด ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (H_2S) ของก๊าซชีวภาพจากข้อมูลจริงที่เก็บจากโรงงานในจังหวัดสุพรรณบุรี เป็นข้อมูลรายเดือนจำนวน 96 ข้อมูล เพื่อนำมาหาตัวแบบพยากรณ์จากองค์ประกอบของก๊าซทั้งสามชนิด โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบทั้ง 4 วิธี มีผลการศึกษาแยกเป็น 2 กรณี คือ การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซทั้งสามชนิด เพื่อหาตัวพยากรณ์ที่เหมาะสมและหลังจากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพอากาศที่ดีที่สุด จะนำตัวแบบที่ได้ไปพยากรณ์เพื่อหาแนวโน้มคุณภาพอากาศในอนาคตต่อไป มีรายละเอียดดังนี้

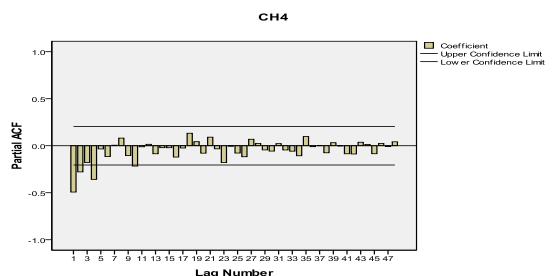
3.1 การวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีหาตัวแบบพยากรณ์องค์ประกอบของอนุกรมเวลาทั้งสามชนิด ได้แก่ ก๊าซ CH_4 ก๊าซ CO_2 และก๊าซ H_2S ทั้งนี้การ

สร้างตัวแบบการพยากรณ์ทั้ง 4 วิธี ได้แก่ วิธี BJ วิธี Holt วิธี Brown และวิธี Damped จากข้อมูลอนุกรมเวลาก๊าซชีวภาพสามารถแสดงผลตัวแบบอนุกรมเวลาได้ดังนี้

1) ตัวแบบอนุกรมเวลามีเทน (CH_4) แสดงค่า ACF และค่า PACF มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลไม่คงที่ จึงแปลงข้อมูลก๊าซ CH_4 ด้วยผลต่างลำดับที่ 1 ($d = 1$) ได้กราฟค่า ACF และกราฟค่า PACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CH_4 ในรูปที่ 1-2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ค่า ACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CH_4



รูปที่ 2 ค่า PACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CH_4

ค่า ACF และค่า PACF ของก๊าซ CH_4 มีลักษณะคงที่ ดังนั้นการสร้างตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH_4 ที่เหมาะสม คือ ตัวแบบ ARIMA (0, 1, 1) พร้อมกับเขียนเป็นตัวแบบอนุกรมเวลาของทั้ง 4 วิธีได้ดังตารางที่ 2

ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH_4 จากทั้ง 4 วิธี ที่รูปแบบที่เหมาะสม คือ ARIMA (0, 1, 1) นั้นเพื่อการพยากรณ์ปริมาณก๊าซในอนาคต ทาทิศทางแนวโน้มและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงทำการเปรียบเทียบความแม่นยำตัวแบบการพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ RMSE และ

MAPE ในการแสดงค่าประสิทธิภาพของตัวแบบอนุกรมเวลาในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH₄ จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบพยากรณ์	ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH ₄ : ARIMA (0, 1, 1)
1. BJ	$\hat{Z}_t = 0.161Z_{t-1} - 0.061e_{t-1}$
2. Holt	$\hat{Z}_{t+m} = 55.204 + 0.160m$
3. Brown	$\hat{Z}_{t+m} = 51.961 + 0.198 \left[(m-1) + \frac{1}{0.051} \right]$
4. Damped	$\hat{Z}_{t+m} = 54.460 + 0.160 \sum_{i=1}^m (0.999)^i$

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH₄ จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบวิเคราะห์	Kolmogorov -Smirnov	t-test	Levene Statistic	Runs Test
1. BJ	0.039	0.808	0.436	0.009
2. Holt	0.056	0.982	0.533	0.024
3. Brown	0.037	0.645	0.553	0.218
4.Damped	0.067	0.862	0.449	0.065

หมายเหตุ การตรวจสอบความเหมาะสม (p-value) ของตัวแบบอนุกรมเวลาที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในตารางที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 โดยพิจารณาที่ความคลาดเคลื่อน พบว่า ความคลาดเคลื่อนของทั้งสี่วิธีมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov p-value) สถิติทดสอบ t (p-value) แสดงค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ค่า Levene Statistic (p-value) มีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา แต่มีค่า Runs Test Z เคลื่อนไหวของวิธี BJ ไม่เป็นอิสระกัน (p-value = 0.009) ดังนั้นตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH₄ ที่สร้างขึ้นไม่มีความเหมาะสม จึงไม่มีความเหมาะสม แต่ถ้าพิจารณาการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าอนุกรมเวลาก๊าซ CH₄ ในข้อมูลชุดสอง

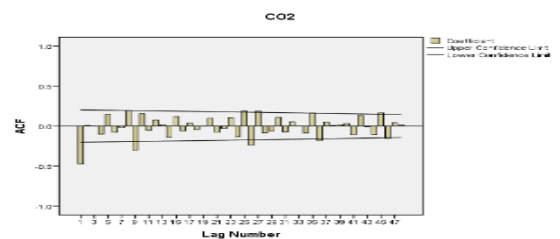
ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 12 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE แสดงประสิทธิภาพตัวพยากรณ์ทั้ง 4 วิธี ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CH₄ จากทั้ง 4 วิธี

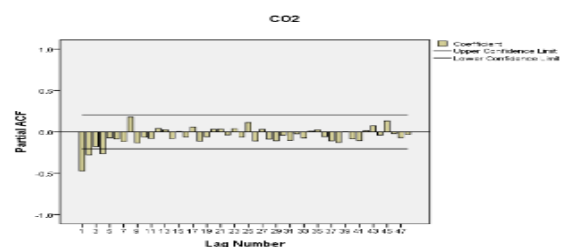
การพยากรณ์	BJ	Holt	Brown	Damped
MAPE	24.407	25.672	27.145	24.016
RMSE	10.972	11.533	12.197	10.798

วิธี Damped จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากทั้ง 4 วิธี เพราะค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ของวิธี Damped จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

2) ตัวแบบอนุกรมเวลาคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แสดงค่า ACF และค่า PACF มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลไม่คงที่โดยมีค่าความสัมพันธ์สูงเกินขอบเขตที่กำหนด จึงแปลงข้อมูลก๊าซ CO₂ ด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 (d = 1) ได้กราฟค่า ACF และกราฟค่า PACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ ในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3 ค่า ACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂



รูปที่ 4 ค่า PACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂

ค่า ACF และค่า PACF มีลักษณะคงที่ ดังนั้น การสร้างตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ ที่เหมาะสม คือ ตัวแบบ ARIMA(0, 1, 1) พร้อมกับเขียนเป็นตัวแบบ พยากรณ์ของทั้ง 4 วิธี ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบ พยากรณ์	ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CO ₂ : ARIMA(0, 1, 1)
1. BJ	$\hat{Z}_t = Z_{t-1} - 0.7613e_{t-1}$
2. Holt	$\hat{Z}_{t+m} = 28.8047 - 0.1551m$
3. Brown	$\hat{Z}_{t+m} = 30.9733 - 0.3470$ $\left[(m-1) + \frac{1}{0.0957} \right]$
4. Damped	$\hat{Z}_{t+m} = 28.8012 - 0.1551$ $\sum_{i=1}^m (0.9999)^i$

ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ จากทั้ง 4 วิธี ที่ รูปแบบที่เหมาะสม คือ ARIMA (0, 1, 1) นั้นเพื่อการ พยากรณ์ปริมาณก๊าซในอนาคต หาค่าทิศทางแนวโน้มและ ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงทำการเปรียบเทียบความ แม่นยำตัวแบบการพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ RMSE และ MAPE ในการแสดงค่าประสิทธิภาพของตัวแบบ พยากรณ์ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบ อนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบ วิเคราะห์	Kolmogorov- Smirnov	t-test	Levene Statistic	Runs Test
1. BJ	0.807	0.303	0.711	0.605
2. Holt	0.755	0.929	0.622	0.837
3. Brown	0.715	0.536	0.685	0.538
4. Damped	0.765	0.927	0.619	0.837

หมายเหตุ การตรวจสอบความเหมาะสม (p-value) ของตัวแบบ พยากรณ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ พยากรณ์ในตารางที่ 6 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 โดย พิจารณาที่ความคลาดเคลื่อน พบว่า ความคลาดเคลื่อน ของทั้งสี่วิธีมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov p-value) สถิติทดสอบ t (p-value) แสดงค่าเฉลี่ยเท่ากับ ศูนย์ ค่า Levene Statistic (p-value) มีความแปรปรวน เท่ากันทุกช่วงเวลา และค่า Runs Test Z เคลื่อนไหวเป็น อิสระกัน (p-value) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์อนุกรมเวลา ก๊าซ CO₂ ที่สร้างขึ้นไม่มีความเหมาะสม จึงไม่มีความ เหมาะสม แต่ถ้าพิจารณาการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่า พยากรณ์อนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ ในข้อมูลชุดสองตั้งแต่ เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 12 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE แสดงประสิทธิภาพ ตัวพยากรณ์ ทั้ง 4 วิธี ได้ดังตารางที่ 7

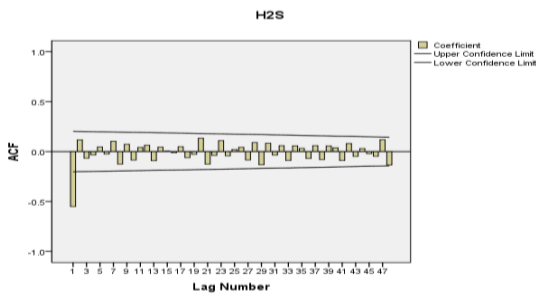
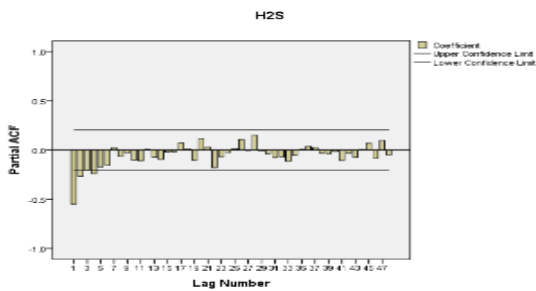
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบ อนุกรมเวลาก๊าซ CO₂ จากทั้ง 4 วิธี

การ พยากรณ์	BJ	Holt	Brown	Damped
MAPE	3.4687	8.6402	16.4392	8.6684
RMSE	1.6685	2.8340	5.0898	2.8407

วิธี BJ จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากทั้ง 4 วิธี เพราะค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการ พยากรณ์ของวิธี BJ จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมาก ที่สุด

3) ตัวแบบอนุกรมเวลาเวลาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (H₂S) แสดงค่า ACF และค่า PACF มีส่วนประกอบของ แนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลไม่คงที่ จึงแปลง ข้อมูลก๊าซ H₂S ด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 (d = 1) ได้ กราฟค่า ACF และกราฟค่า PACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S ในรูปที่ 5-6 ตามลำดับ

ค่า ACF และค่า PACF ของก๊าซ H₂S มี ลักษณะคงที่ ดังนั้นการสร้างตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S ที่เหมาะสม คือ ตัวแบบ ARIMA(1, 1, 0) พร้อมกับ เขียนเป็นตัวแบบพยากรณ์ของทั้ง 4 วิธี ได้ดังตารางที่ 8

รูปที่ 5 ค่าACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ H₂Sรูปที่ 6 ค่าPACF ของอนุกรมเวลาก๊าซ H₂Sตารางที่ 8 ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบพยากรณ์	ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H ₂ S : ARIMA(1, 1, 0)
1. BJ	$\hat{Z}_t = 0.6971Z_{t-1} + 0.3028Z_{t-2}$
2. Holt	$\hat{Z}_{t+m} = 3491.9828 - 16.7465m$
3. Brown	$\hat{Z}_{t+m} = 4574.4494$
4. Damped	$\hat{Z}_{t+m} = 3772.0011 - 111.5866 \sum_{i=1}^m (0.3918)^i$

ตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S จากทั้ง 4 วิธี ที่รูปแบบที่เหมาะสม คือ ARIMA(1, 1, 0) นั้นเพื่อการพยากรณ์ปริมาณก๊าซในอนาคต ทาทิศทางแนวโน้มและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงทำการเปรียบเทียบความแม่นยำตัวแบบการพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ RMSE และ MAPE ในการแสดงค่าประสิทธิภาพของตัวแบบในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S จากทั้ง 4 วิธี

ตัวแบบวิเคราะห์	Kolmogorov-Smirnov	t-test	Levene Statistic	Runs Test
1. BJ	0.295	0.803	0.690	0.756
2. Holt	0.599	0.826	0.614	0.538
3. Brown	0.430	0.545	0.647	0.002
4. Damped	0.600	0.776	0.615	0.538

หมายเหตุ การตรวจสอบความเหมาะสม (p-value) ของตัวแบบพยากรณ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบในตารางที่ 9 ระดับนัยสำคัญ 0.01 โดยพิจารณาที่ความคลาดเคลื่อน พบว่า ความคลาดเคลื่อนของทั้งสี่วิธีมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov p-value) สถิติทดสอบ t (p-value) แสดงค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ค่า Levene Statistic (p-value) มีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา แต่มีค่า Runs Test Z เคลื่อนไหวของวิธี Brown ไม่เป็นอิสระกัน (p-value = 0.002) ดังนั้นตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S ที่สร้างขึ้นไม่มีความเหมาะสม จึงไม่มีความเหมาะสม แต่ถ้าพิจารณาการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์อนุกรมเวลาก๊าซ H₂S ในข้อมูลชุดสองตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 12 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE แสดงประสิทธิภาพตัวพยากรณ์ ทั้ง 4 วิธี ได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบอนุกรมเวลาก๊าซ H₂S จากทั้ง 4 วิธี

การพยากรณ์	BJ	Holt	Brown	Damped
MAPE	21.7870	15.4629	55.7112	16.4094
RMSE	1,006.80	591.35	1,942.36	630.01

วิธี Holt จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากทั้ง 4 วิธี เพราะค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการพยากรณ์ของวิธี Holt จึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

3.2 การพยากรณ์องค์ประกอบข้อมูลอนุกรมเวลา
ผลของการเปรียบเทียบความเหมาะสมของตัวแบบ
อนุกรมของก๊าซทั้งสามชนิด ได้แก่ วิธี Damped
เหมาะสมกับก๊าซ CH_4 วิธี BJ เหมาะสมกับก๊าซ CO_2
และวิธี Holt เหมาะสมกับก๊าซ H_2S จึงนำตัวแบบที่

เหมาะสมมาพยากรณ์คุณภาพอากาศในข้อมูลชุดสอง
ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560
จำนวน 12 ค่า แล้วนำผลมาเทียบกับค่าคุณภาพอากาศ
ที่นำมาจากข้อมูลจริงที่เกิดจากค่าเฉลี่ยของแต่ละเดือน
จากข้อมูลในชุดแรก ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การพยากรณ์องค์ประกอบข้อมูลอนุกรมเวลาของของก๊าซทั้งสามชนิด

เดือน	ค่า พยากรณ์ พ.ศ. 2560			ข้อมูลประมาณจากข้อมูลจริงในชุดแรก		
	Damped BJ Holt			Damped BJ Holt		
	ก๊าซ CH_4	ก๊าซ CO_2	ก๊าซ H_2S	ก๊าซ CH_4	ก๊าซ CO_2	ก๊าซ H_2S
ม.ค.	56.5	32.2	3,274	44.8	41.0	6422.2
ก.พ.	56.7	28.9	3,258	47.2	36.4	6172.2
มี.ค.	56.9	26.9	3,241	46.9	36.7	5223.3
เม.ย.	57.0	30.3	3,224	47.8	39.4	6422.2
พ.ค.	57.2	29.5	3,207	53.1	36.9	6991.1
มิ.ย.	57.3	30.2	3,191	47.4	39.1	7364.4
ก.ค.	57.5	28.3	3,174	50.2	35.6	6877.1
ส.ค.	57.7	28.1	3,157	48.6	37.3	6043.3
ก.ย.	57.8	26.7	3,140	42.8	36.0	4690.0
ต.ค.	58.0	29.5	3,124	51.1	36.0	5285.5
พ.ย.	58.1	31.3	3,107	46.2	40.1	5373.3
ธ.ค.	58.3	30.0	3,090	45.6	38.9	4531.1

การพยากรณ์ ข้อมูล อนุกรมเวลาของ
องค์ประกอบก๊าซทั้งสามชนิดด้วยตัวแบบที่คัดเลือกมา
จากการหาตัวแบบพยากรณ์องค์ประกอบของอนุกรมเวลา
ก๊าซทั้งสามชนิดที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้วิธี Damped สร้าง
ตัวแบบอนุกรมเวลาของก๊าซ CH_4 ได้ใกล้เคียงกับค่าประมาณ
จริงมากที่สุด รองลงมาคือ วิธี BJ สร้างตัวแบบอนุกรมเวลา
ก๊าซ CO_2 ได้ใกล้เคียงเล็กน้อย ส่วนวิธี Holt สร้างตัวแบบ
อนุกรมเวลาของก๊าซ H_2S ห่างจากค่าประมาณจริงอยู่มาก
ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้นในช่วงการหาตัวแบบที่เหมาะสม
จากการคัดเลือกเปรียบเทียบทั้ง 4 วิธีจึงนำมาหาค่า
พยากรณ์ พบว่าค่าที่ได้ห่างจากค่าจริงและไม่สามารถ
แสดงค่าพยากรณ์ที่เหมาะสมในอนาคตได้

สรุปผล

จากการศึกษาการเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์
ข้อมูลคุณภาพอากาศ กรณีศึกษาพลังงานก๊าซชีวภาพใน
จังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งตัวแบบพยากรณ์ข้อมูลอนุกรม
เวลาองค์ประกอบก๊าซทั้งสามชนิด ได้แก่ ก๊าซ CH_4 ก๊าซ
 CO_2 และก๊าซ H_2S โดยเลือกวิธีวิเคราะห์ 4 วิธีได้แก่ วิธี
BJ วิธี Holt วิธี Brown และวิธี Damped ตามลำดับ
โดยพบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนประกอบของค่า
แนวโน้มและความผันแปรฤดูกาลไม่คงที่จึงเลือกใช้การ
แปลงค่า จากนั้นหาตัวพยากรณ์ที่เหมาะสมนั้นคือ วิธี
Damped เหมาะสมกับก๊าซ CH_4 วิธี BJ เหมาะสมกับ
ก๊าซ CO_2 และวิธี Holt เหมาะสมกับก๊าซ H_2S

ตามลำดับ จากนั้นได้นำตัวแบบไปหาค่าพยากรณ์ในอนาคต พบว่าวิธี Damped สร้างตัวแบบอนุกรมเวลาข้อมูลก๊าซ CH_4 ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด แต่เนื่องจากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องประกอบด้วยก๊าซชนิดอื่น ๆ ที่ได้ให้ผลสะท้อนคุณภาพอากาศ จึงจำเป็นต้องนำมาศึกษาเพื่อจะได้แสดงถึงคุณภาพอากาศในจังหวัดสุพรรณบุรี จากปัญหาที่ทำให้ได้ตัวแบบไม่เหมาะสมอาจมีผลมาจากปัจจัยและสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเก็บข้อมูลไม่คงที่ในแต่ละเดือน อาจจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนมาเก็บเป็นข้อมูลรายวันหรือความผันแปรในการผลิตก๊าซ ได้แก่ อุณหภูมิของระบบ ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ ค่าความเหมาะสมต่อความเป็นกรดและด่าง ระยะเวลาในถังหมักและการคลุกเคล้าสารอินทรีย์ในบ่อหมัก ดังนั้นถ้ามีการควบคุมวิธีการที่ได้ข้อมูลมาใหม่อาจจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีแนวคิดวิธีวิเคราะห์หาตัวแบบที่เหมาะสมดังนี้ งานตัวแบบ [6] ตัวแบบผสมสำหรับข้อมูลคุณภาพอากาศระหว่างวิธีบ็อกซ์เจนกินส์และโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับที่สามารถใช้ได้กับการพยากรณ์ งานวิจัยของ Chuentawat [7] แสดงการพยากรณ์ค่าความเข้มข้นของค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอนด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับรูปแบบบอโรไตรเกรสซิชโดยใช้ค่าจริงรายวันในการวิเคราะห์เชิงเดี่ยวได้อย่างเหมาะสมและงานศึกษา Kiratiwiboon [8] ศึกษาการพยากรณ์ระหว่างวิธีบ็อกซ์เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่มีฤดูกาลอย่างง่าย เช่น วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังของบราวน์และวิธีการทำให้เรียบแบบเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแตรมา ทั้งนี้อาจทำให้การพยากรณ์เหมาะสมมากขึ้น ดังนั้นหากนำแนวคิดเบื้องต้นมาประกอบการศึกษาใหม่ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์คุณภาพอากาศจากพลังงานทางเลือกก๊าซชีวภาพในจังหวัดสุพรรณบุรีครั้งต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Manmin M. Time series and forecasting. 1st edition. Bangkok: Four Printing Company. 2006.
2. Lorjeerachunkul W, Chittawet J. Forecasting techniques. 1st edition. Bangkok: Academic Document Promotion Project National Institute of Development Administration, 2005.
3. Ket-iam S. Forecasting techniques. 2nd edition. Songkhla: Thaksin University. 2005.
4. Taesombat S. Quantitative forecasting. 1st edition. Bangkok: Kasetsart University. 2006.
5. IBM Corporation. Brown's Exponential Smoothing (TSMODEL Algorithms) [Internet]. Availability from: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSLVMB_22.0.0/com.ibm.spss.statistics.algorithms/alg_ts_model_models_exsmooth_browns.htm.
6. Somsila C, Chiewwattana S, Sunat K. Mixed model for air quality forecasting Case study of air quality data in Thailand. The 11th Annual Graduate Research Research Conference. 2010. p. 247-58.
7. Chuentawat R. Prediction of dust concentrations as small as 10 microns with a neural network in combination with an autoregistration model. Burapha Science Journal. 2017;22(3):519-37.
8. Kiratiwiboon K. Comparison of forecasting methods between the Box-Jenkins method. Simple seasonal exponential smoothing method and combined forecasting method. For forecasting the average monthly temperature in Bangkok. Burapha Science Journal. 2013;18(2):149-60.



Efficient Modified Estimator for the Mean Estimation Using Auxiliary Information in Sample Surveys

Napattchan Dansawad*

Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, THAILAND

*Corresponding author e-mail: napattchan.dan@kmutt.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: April 6, 2022

Revised: May 5, 2022

Accepted: May 10, 2022

Available online: June 7, 2022

DOI: [10.14456/jarst.2022.6](https://doi.org/10.14456/jarst.2022.6)

Keywords: Auxiliary variable, Bias, Modified estimators, MSE, Population mean

Several researchers use the auxiliary information to enhance the efficiency of their estimators in estimating the population parameters in sample surveys. Studies aim to find out more efficient estimators than recently proposed estimators and make inferences about the unknown population parameters such as population total, population mean, population proportion, or population variance. And one of the population parameters that are widely studied and used, is the population means. In this paper, the author attempts to develop a new modified estimator for the mean of the population in simple random sampling without replacement (SRSWOR) by utilizing information on four auxiliary variables. Therefore, the new estimators with their properties up to the first degree of approximation such as bias and Mean Squared Error (MSE) have been studied. In addition, the optimum value of the real numbers and the minimum MSE of the proposed estimators have been investigated. A few members were also derived from the proposed estimators by allocating the different suitable values of constants. Furthermore, the efficiency of the proposed estimators has been compared with other relevant existing estimators through theoretical study. While the data of peppermint oil production data in Digah India is used for the empirical study to compare the performance of the new

estimator with other existing estimators. The results of this paper showed that the new estimators are more efficient under the criteria of MSE and Percent Relative Efficiencies (PRE) as compared to all other consideration estimators for certain natural populations available in the literature.

INTRODUCTION

In the sampling theory literature, many authors have introduced the use of auxiliary information to increase the efficiency of their estimators. For instance, Cochran [1] used the strong positive correlation between study and auxiliary variables to present the ratio estimator. On the other hand, if the correlation between study and auxiliary variables is strongly negative, then the product estimator proposed by Robson [2] and Murthy [3] may be used. Recent developments in both ratio and product estimators, together with their variety of modified forms are clearly described in detail by Sisodia and Dwivedi [4], Pandey and Dubey [5], Upadhyaya and Singh [6], Singh [7], Singh and Tailor [8], Kadilar and Cingi [9, 10], Singh *et al.* [11], Singh and Tailor [12], Al-Omari *et al.* [13], Singh *et al.* [14], Yan and Tian [15], Singh *et al.* [16], Subramani and Kumarpandiyan [17], Jeelani *et al.* [18], and Jerajuddin and Kishun [19].

Many estimators were further extended to cover the proposed previously by Khoshnevisan *et al.* [20]. The estimator of Khoshnevisan *et al.* [20] is given as follows:

$$\bar{y}_1 = \bar{y} \left(\frac{a\bar{X} + c}{\alpha(a\bar{x} + c) + (1-\alpha)(a\bar{X} + c)} \right)^g, \quad (1)$$

Where $\bar{y}$ and $\bar{X}$ are the sample means of the study and auxiliary variables, respectively, whereas $\bar{X}$ is the population mean of the auxiliary variable. The consonants $a(a \neq 0)$ and c are either real numbers or functions of auxiliary variables such as variance, $(S_x^2 = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2)$, coefficient of variation $(C_x = S_x / \bar{X})$, and correlation coefficient $(\rho_{yx} = S_{yx} / S_y S_x)$. In contrast, the consonants α and g are integer to be determined.

The bias and MSE of this family of Khoshnevisan *et al.* [20] estimators are respectively shown as:

$$\text{Bias}(\bar{y}_1) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y} \alpha g \theta C_x^2 \left[\frac{(g+1)}{2} \alpha \theta - C \right], \quad (2)$$

$$\text{MSE}(\bar{y}_1) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \alpha g \theta C_x^2 (\alpha \theta g - 2C) \right], \quad (3)$$

where $f = n/N$, $\theta = a\bar{X} / (a\bar{X} + b)$,

$$C_y^2 = S_y^2 / \bar{Y}^2, \quad S_y^2 = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2,$$

$$C_{yx} = S_{yx} / \bar{Y} \bar{X}, \quad C = \rho_{yx} C_y / C_x, \text{ and}$$

$$S_{yx} = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X}).$$

However, Khoshnevisan *et al.* [20] estimator is quite difficult to use in practice. Therefore, Yadav *et al.* [21] improved the estimator of Khoshnevisan *et al.* [20] by using the assumption of the values of α and g

equal to one and adding the consonants of b and d in equation (1), as:

$$\bar{y}_2 = \bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right), \quad (4)$$

The bias and MSE Yadav *et al.* [21] estimators are respectively shown as:

$$Bias(\bar{y}_2) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y} \eta C_x^2 (\eta - C), \quad (5)$$

$$MSE(\bar{y}_2) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta C_x^2 (\eta - 2C)], \quad (6)$$

where $\eta = ab\bar{X} / (ab\bar{X} + cd)$.

In this present paper, the authors have suggested the modification of Yadav *et al.* [21] by using the concept of power transformation under SRSWOR scheme. The expressions in terms of bias, MSE, and minimum MSE of proposed estimators were obtained. In addition, comparative studies of the proposed estimators with other relevant existing estimators have been considered through the theoretical and empirical studies, which show the efficiency of the proposed estimators was clearly better than the other estimators.

MATERIALS AND METHODS

Modified Estimator

The authors propose to create a new estimator by adjusting the Yadav *et al.* [21] using the concept of power transformation under SRSWOR scheme. When the term of $\left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)$ from equation (4) is raised to the power of constant g , the new estimator is as follows:

$$\bar{y}_3 = \bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)^g. \quad (7)$$

After that, if the sample mean $\bar{y}$ in equation (7) is replaced with $\bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)^{1-g}$, the new modified estimator of population mean is obtained as:

$$\begin{aligned} \bar{y}_4 &= \bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)^g \left(\frac{ab\bar{x} + cd}{ab\bar{X} + cd} \right)^{1-g}, \\ &= \bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)^{2g-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

To obtain the bias and MSE of $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ under SRSWOR, let us define

$$\bar{y} = \bar{Y}(1 + e_0) \text{ and } \bar{x} = \bar{X}(1 + e_1) \quad (9)$$

where e_0 and e_1 are the sampling error on auxiliary and study variables, respectively.

Further, one may assume that

$$E(e_0) = E(e_1) = 0. \quad (10)$$

When the population parameter of the auxiliary variable is known, after solving the expectations, the following expression is obtained as

$$\left. \begin{aligned} E(e_0^2) &= \frac{(1-f)}{n} C_y^2, \\ E(e_1^2) &= \frac{(1-f)}{n} C_x^2, \text{ and} \\ E(e_0 e_1) &= \frac{(1-f)}{n} CC_x. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

The bias of $\bar{y}_3$ can be found as follows:

$$\begin{aligned} Bias(\bar{y}_3) &= E(\bar{y}_3 - \bar{Y}) \\ &= E \left[\bar{y} \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{x} + cd} \right)^g - \bar{Y} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

By using the equation (9), one can rewrite the above equation, as

$$\begin{aligned} \text{Bias}(\bar{y}_3) &= E \left[\bar{Y}(1+e_0) \left(\frac{ab\bar{X} + cd}{ab\bar{X}(1+e_1) + cd} \right)^g - \bar{Y} \right] \\ &= E \left[\bar{Y}(1+e_0)(1+\eta e_1)^{-g} - \bar{Y} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Rewrite equation (13) in terms of equations (10) and (11); one gets

$$\begin{aligned} \text{Bias}(\bar{y}_3) &= E \left[\bar{Y}(1+e_0)(1-g\eta e_1 + \frac{g(g+1)}{2}\eta^2 e_1^2) - \bar{Y} \right] \\ &= \bar{Y}E \left[1-g\eta e_1 + \frac{g(g+1)}{2}\eta^2 e_1^2 + e_0 - g\eta e_0 e_1 - \bar{Y} \right] \\ &= \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}g\eta C_x^2 \left[\frac{(g+1)}{2}\eta - C \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Further, bias of $\bar{y}_4$ is obtained from equation (15) as follows:

$$\text{Bias}(\bar{y}_4) = \frac{(1-f)}{n} (2g-1)\eta \bar{Y} C_x^2 [g\eta - C]. \quad (15)$$

In addition, the MSE of $\bar{y}_3$ can be found as follows:

$$\begin{aligned} \text{MSE}(\bar{y}_3) &= E(\bar{y}_3 - \bar{Y})^2 \\ &= E \left[\bar{Y}(1+e_0)(1+\eta e_1)^{-g} - \bar{Y} \right]^2 \\ &= \bar{Y}^2 E \left[-g\eta e_1 + \frac{g(g+1)}{2}\eta^2 e_1^2 + e_0 - g\eta e_0 e_1 \right]^2 \\ &= \bar{Y}^2 E \left[g^2 \eta^2 e_1^2 + e_0^2 - 2g\eta e_0 e_1 \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Rewrite equation (16) in term of equations (10) and (11), one get

$$\begin{aligned} \text{MSE}(\bar{y}_3) &= \bar{Y}^2 \left[g^2 \eta^2 \frac{(1-f)}{n} C_x^2 + \frac{(1-f)}{n} C_y^2 - 2g\eta \frac{(1-f)}{n} C C_x^2 \right] \\ &= \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + g^2 \eta^2 C_x^2 - 2g\eta C C_x^2]. \end{aligned} \quad (17)$$

The MSE of $\bar{y}_4$ can be found from equation (18) as follows:

$$\text{MSE}(\bar{y}_4) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + (2g-1)\eta C_x^2 [(2g-1)\eta - 2C]]. \quad (18)$$

The MSE of $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ at (17) and (18) depends on three constants g, η and C . So, keeping the values of g and C fixed. To obtain the value of η that minimizes for $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ respectively, one takes the partial derivative of equation (17) for $\bar{y}_3$ and (18) for $\bar{y}_4$ with respect to η and equate in each equation to zero. Therefore, the optimum values of η for $\bar{y}_3$ as

$$\eta = C / g = \eta_{(opt1)}. \quad (19)$$

and the optimum values of η for $\bar{y}_4$ as

$$\eta = C / (2g-1) = \eta_{(opt2)}. \quad (20)$$

To replace the optimum values of η for $\bar{y}_3$ equation (19) into equation (17), the minimum MSE of $\bar{y}_3$ is given by:

$$\min. \text{MSE}(\bar{y}_3) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 - C^2 C_x^2]. \quad (21)$$

And the substitution of the optimum values of η for $\bar{y}_4$ of equation (20) in equation (18) yields the minimum MSE of $\bar{y}_4$ as

$$\min. \text{MSE}(\bar{y}_4) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 - C^2 C_x^2], \quad (22)$$

which is the same equation as before.

Therefore, the common minimum MSE of $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ is given by:

$$\min. \text{MSE}(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 - C^2 C_x^2]. \quad (23)$$

To replace the different choices of the constants a, b, c, d, α and g into equations (1), (4), (7), $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$, and $\bar{y}_4$ as given in Table 1:

Table 1 A few members of $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$, and $\bar{y}_4$

Estimator	Values of constants					
	a	b	c	d	α	g
A few members of $\bar{y}_1$						
$\bar{y}_{1(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \beta_1(x)}{\bar{X} + \beta_1(x)} \right)$ Yan and Tian (15)	1	-	$\beta_1(x)$	-	1	1
$\bar{y}_{1(2)} = \bar{y} \left(\frac{n\bar{X} + \rho_{yx}}{n\bar{X} + \rho_{yx}} \right)$ Yadav et al. (21)	n	-	ρ_{yx}	-	1	1
$\bar{y}_{1(3)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)\bar{X} + \rho_{yx}}{\beta_1(x)\bar{X} + \rho_{yx}} \right)$	$\beta_1(x)$	-	ρ_{yx}	-	1	1
$\bar{y}_{1(4)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \beta_1(x)}{\bar{X} + \beta_1(x)} \right)$	1	-	$\beta_1(x)$	-	1	-1
$\bar{y}_{1(5)} = \bar{y} \left(\frac{n\bar{X} + \rho_{yx}}{n\bar{X} + \rho_{yx}} \right)$	n	-	ρ_{yx}	-	1	-1
$\bar{y}_{1(6)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)\bar{X} + \rho_{yx}}{\beta_1(x)\bar{X} + \rho_{yx}} \right)$	$\beta_1(x)$	-	ρ_{yx}	-	1	-1
A few members of $\bar{y}_2$						
$\bar{y}_{2(1)} = \bar{y} \left(\frac{C_x \bar{X} + \beta_1(x)}{C_x \bar{X} + \beta_1(x)} \right)$ Yan and Tian (15)	1	C_x	$\beta_1(x)$	1	-	-
$\bar{y}_{2(2)} = \bar{y} \left(\frac{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}}{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}} \right)$ Yadav et al. (21)	n	C_x	ρ_{yx}	1	-	-
$\bar{y}_{2(3)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x}{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x} \right)$ Yadav et al. (21)	$\beta_1(x)$	M_d	ρ_{yx}	C_x	-	-
A few members of $\bar{y}_3$						
$\bar{y}_{3(1)} = \bar{y} \left(\frac{C_x \bar{X} + \beta_1(x)}{C_x \bar{X} + \beta_1(x)} \right) = \bar{y}_{2(1)}$	1	C_x	$\beta_1(x)$	1	-	1
$\bar{y}_{3(2)} = \bar{y} \left(\frac{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}}{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{2(2)}$	n	C_x	ρ_{yx}	1	-	1
$\bar{y}_{3(3)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x}{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x} \right) = \bar{y}_{2(3)}$	$\beta_1(x)$	M_d	ρ_{yx}	C_x	-	1
$\bar{y}_{3(4)} = \bar{y} \left(\frac{C_x \bar{X} + \beta_1(x)}{C_x \bar{X} + \beta_1(x)} \right)$	1	C_x	$\beta_1(x)$	1	-	-1

Estimator	Values of constants					
	a	b	c	d	α	g
$\bar{y}_{3(5)} = \bar{y} \left(\frac{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}}{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}} \right)$	n	C_x	ρ_{yx}	1	-	-1
$\bar{y}_{3(6)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x}{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x} \right)$	$\beta_1(x)$	M_d	ρ_{yx}	C_x	-	-1
A few members of $\bar{y}_4$						
$\bar{y}_{4(1)} = \bar{y} \left(\frac{C_x \bar{X} + \beta_1(x)}{C_x \bar{X} + \beta_1(x)} \right) = \bar{y}_{3(1)} = \bar{y}_{2(1)}$	1	C_x	$\beta_1(x)$	1	-	1
$\bar{y}_{4(2)} = \bar{y} \left(\frac{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}}{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{3(2)} = \bar{y}_{2(2)}$	n	C_x	ρ_{yx}	1	-	1
$\bar{y}_{4(3)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x}{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x} \right) = \bar{y}_{3(3)} = \bar{y}_{2(3)}$	$\beta_1(x)$	M_d	ρ_{yx}	C_x	-	1
$\bar{y}_{4(4)} = \bar{y} \left(\frac{C_x \bar{X} + \beta_1(x)}{C_x \bar{X} + \beta_1(x)} \right) = \bar{y}_{3(4)}$	1	C_x	$\beta_1(x)$	1	-	0
$\bar{y}_{4(5)} = \bar{y} \left(\frac{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}}{nC_x \bar{X} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{3(5)}$	n	C_x	ρ_{yx}	1	-	0
$\bar{y}_{4(6)} = \bar{y} \left(\frac{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x}{\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x} \right) = \bar{y}_{3(6)}$	$\beta_1(x)$	M_d	ρ_{yx}	C_x	-	0

Efficiency Comparisons

In this section, the authors intend to compare the efficiency of $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ with other existing estimators, as shown in Table 1. It is well known that the MSE of the unbiased estimator $\bar{y}$ under SRSWOR is given by

$$MSE(\bar{y}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 C_y^2. \quad (24)$$

The expressions for the MSE of a few members of $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$, $\bar{y}_3$, and $\bar{y}_4$ are derived as

$$MSE(\bar{y}_{1(1)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_1 C_x^2 (\theta_1 - 2C)] \quad (25)$$

$$MSE(\bar{y}_{1(2)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_2 C_x^2 (\theta_2 - 2C)] \quad (26)$$

$$MSE(\bar{y}_{1(3)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_3 C_x^2 (\theta_3 - 2C)] \quad (27)$$

$$MSE(\bar{y}_{1(4)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_4 C_x^2 (\theta_4 + 2C)] \quad (28)$$

$$MSE(\bar{y}_{1(5)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_5 C_x^2 (\theta_5 + 2C)] \quad (29)$$

$$MSE(\bar{y}_{1(6)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \theta_6 C_x^2 (\theta_6 + 2C)] \quad (30)$$

$$MSE(\bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(1)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_1 C_x^2 (\eta_1 - 2C)] \quad (31)$$

$$MSE(\bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(2)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_2 C_x^2 (\eta_2 - 2C)] \quad (32)$$

$$MSE(\bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(3)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_3 C_x^2 (\eta_3 - 2C)] \quad (33)$$

$$MSE(\bar{y}_{3(4)}, \bar{y}_{4(4)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_1 C_x^2 (\eta_1 + 2C)] \quad (34)$$

$$MSE(\bar{y}_{3(5)}, \bar{y}_{4(5)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_2 C_x^2 (\eta_2 + 2C)] \quad (35)$$

$$MSE(\bar{y}_{3(6)}, \bar{y}_{4(6)}) = \frac{(1-f)}{n} \bar{Y}^2 [C_y^2 + \eta_3 C_x^2 (\eta_3 + 2C)] \quad (36)$$

where $\theta_1 = \bar{X} / (\bar{X} + \beta_1(x))$,

$$\theta_2 = n\bar{X} / (n\bar{X} + \rho_{yx}),$$

$$\theta_3 = \beta_1(x)\bar{X} / (\beta_1(x)\bar{X} + \rho_{yx}),$$

$$\eta_1 = C_x \bar{X} / (C_x \bar{X} + \beta_1(x)),$$

$$\eta_2 = nC_x \bar{X} / (nC_x \bar{X} + \rho_{yx}),$$

$$\eta_3 = \beta_1(x)M_d \bar{X} / (\beta_1(x)M_d \bar{X} + \rho_{yx} C_x).$$

It is observed from equations (23) to (36) that the estimators $\bar{y}_3$ and $\bar{y}_4$ are more efficient than

(i) the unbiased estimator $\bar{y}$ if

$$MSE(\bar{y}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = C^2 C_x^2 > 0 \quad (37)$$

(ii) the estimator $\bar{y}_{1(1)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(1)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_1(\theta_1 - 2C) + C^2 > 0 \quad (38)$$

(iii) the estimator $\bar{y}_{1(2)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(2)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_2(\theta_2 - 2C) + C^2 > 0 \quad (39)$$

(iv) the estimator $\bar{y}_{1(3)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(3)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_3(\theta_3 - 2C) + C^2 > 0 \quad (40)$$

(v) the estimator $\bar{y}_{1(4)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(4)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_1(\theta_1 + 2C) + C^2 > 0 \quad (41)$$

(vi) the estimator $\bar{y}_{1(5)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(5)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_2(\theta_2 + 2C) + C^2 > 0 \quad (42)$$

(vii) the estimator $\bar{y}_{1(6)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{1(6)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \theta_3(\theta_3 + 2C) + C^2 > 0 \quad (43)$$

(viii) the estimator $\bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(1)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(1)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \eta_1(\eta_1 - 2C) + C^2 > 0 \quad (44)$$

(ix) the estimator $\bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(2)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(2)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \eta_2(\eta_2 - 2C) + C^2 > 0 \quad (45)$$

(x) the estimator $\bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(3)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(3)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \eta_3(\eta_3 - 2C) + C^2 > 0 \quad (46)$$

(xi) the estimator $\bar{y}_{3(4)}, \bar{y}_{4(4)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{3(4)}, \bar{y}_{4(4)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \eta_1(\eta_1 + 2C) + C^2 > 0 \quad (47)$$

(xii) the estimator $\bar{y}_{3(5)}, \bar{y}_{4(5)}$ if

$$MSE(\bar{y}_{3(5)}, \bar{y}_{4(5)}) - \min.MSE(\bar{y}_3, \bar{y}_4) = \eta_2(\eta_2 + 2C) + C^2 > 0 \quad (48)$$

Empirical Study

To examine the efficiency of the estimators discussed in the present paper, the authors considered the data provided in Yadav *et al.* [21], which details are as follows:

Yadav *et al.* [21] have used the peppermint oil production data in Digha India, and assumed that the yield of peppermint oil (in kilogram) and the area of the field in Bigha were taken as the study and auxiliary variables, respectively. The description of population parameters is summarized in Table 2.

Table 2 Parameters and constants of the population under study

$N = 150$	$\bar{X} = 4.20$,	$C_x = 0.73$
$n = 40$	$\bar{Y} = 33.46$	$C_y = 0.76$
$M_d = 3$	$\rho_{yx} = 0.91$	$\beta_1(x) = 2.80$

The criteria for comparing the efficiency of estimators in this study, the percent relative efficiencies (PRE) of all existing estimators with respect to unbiased estimator $\bar{y}$ was used and presented in Table 3 as follows:

The PRE of all estimators with respect to $\bar{y}$ is calculated by

$$PRE(\bar{y}, \bar{y}_i) = \frac{MSE(\bar{y})}{MSE(\bar{y}_i)} \times 100 \quad (49)$$

where $\bar{y}_i$ denote the estimator that we are interested in comparing with $\bar{y}$ such as $\bar{y}_{1(1)}$, $\bar{y}_{1(2)}$, ..., and so on.

Table 3 MSE and PRE of all existing estimators

Estimator	MSE	PRE
$\bar{y}$	12.9333	100.0000
A few members of $\bar{y}_1$		
$\bar{y}_{1(1)}$	3.6633	353.0511
$\bar{y}_{1(2)}$	2.2498	574.8555
$\bar{y}_{1(3)}$	2.2276	580.5824
$\bar{y}_{1(4)}$	30.7946	41.9985
$\bar{y}_{1(5)}$	47.2251	27.3865
$\bar{y}_{1(6)}$	44.1987	29.2617
A few members of $\bar{y}_2$		
$\bar{y}_{2(1)} = \bar{y}_{3(1)} = \bar{y}_{4(1)}$	4.3757	295.5691
$\bar{y}_{2(2)} = \bar{y}_{3(2)} = \bar{y}_{4(2)}$	2.2477	575.4136
$\bar{y}_{2(3)} = \bar{y}_{3(3)} = \bar{y}_{4(3)}$	2.2371	578.1210
A few members of $\bar{y}_3$		
$\bar{y}_{3(4)} = \bar{y}_{4(4)}$	28.0104	46.1732
$\bar{y}_{3(5)} = \bar{y}_{4(5)}$	47.1335	27.4397
$\bar{y}_{3(6)} = \bar{y}_{4(6)}$	46.6203	27.7418
$\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (Proposed estimator)	2.2232	581.7336

From Table 3, one can derive two preliminary results as follows:

(i) Among all estimators considered in this population group, it is envisaged that the estimators $\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{1(3)}, (\bar{y}_{2(1)} = \bar{y}_{3(1)} = \bar{y}_{4(1)}), (\bar{y}_{2(2)} = \bar{y}_{3(2)} = \bar{y}_{4(2)}),$ and $(\bar{y}_{2(3)} = \bar{y}_{3(3)} = \bar{y}_{4(3)})$ are the parts of the ratio estimator that will be effective when the data are positively correlated. Furthermore, the data of this section are positively correlated so that the values of MSE of these estimators have small when compared with other existing estimators.

On the contrary, the estimators $\bar{y}_{1(4)}, \bar{y}_{1(5)}, \bar{y}_{1(6)}, (\bar{y}_{3(4)} = \bar{y}_{4(4)}), (\bar{y}_{3(5)} = \bar{y}_{4(5)}),$ and $(\bar{y}_{3(6)} = \bar{y}_{4(6)})$ are the parts of the product estimator. Due to this, they have large MSE values compared to other estimators. For proposed estimators $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum), once observed that they have the smallest MSE compared to all estimators in this study. Therefore, one can infer from the values of MSE that among all estimators, the proposed estimators $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum) are the best in the sense of having the smallest MSE.

(ii) When considering the values of PRE of all estimators, one can find that the PRE of estimators $\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{1(3)}, (\bar{y}_{2(1)} = \bar{y}_{3(1)} = \bar{y}_{4(1)}), (\bar{y}_{2(2)} = \bar{y}_{3(2)} = \bar{y}_{4(2)}),$ and $(\bar{y}_{2(3)} = \bar{y}_{3(3)} = \bar{y}_{4(3)})$ have larger PRE values than the estimators $\bar{y}_{1(4)}, \bar{y}_{1(5)}, \bar{y}_{1(6)}, (\bar{y}_{3(4)} = \bar{y}_{4(4)}), (\bar{y}_{3(5)} = \bar{y}_{4(5)}),$ and $(\bar{y}_{3(6)} = \bar{y}_{4(6)})$. Moreover, the proposed estimator $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum) has the largest PRE value compared to all estimators.

From empirical study, one can conclude that the proposed estimators are more desirable overall than those under optimum conditions for this population data.

RESULTS AND DISCUSSIONS

It is well known in sample surveys that when the correlation between the study and auxiliary variables is positive, the performance of the ratio estimator is generally more efficient than the product estimator, which corresponds to the result of Table 3. Table 3 shows that the MSE of the proposed estimator $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum) are consistently less than the other existing estimators under consideration for this population. While the value of PRE of its are persistently higher than other ones. Therefore, one can summarize that the proposed estimator $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum) performs well compared to other existing estimators in terms of MSE and PRE. However, among all estimators, besides the proposed estimator $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ (at its optimum), one recommends using a few members of the estimator $\bar{y}_{1(3)}$ as an inferior alternative to the proposed estimators $\bar{y}_3, \bar{y}_4$ for estimating the population mean. Because the values of MSE and PRE are relatively close to the proposed estimators $\bar{y}_3, \bar{y}_4$.

CONCLUSION

This paper proposed new modified estimators for estimating the population means by adapting the Yadav et al. [21] estimator and using the information on auxiliary variables. The expressions for bias, MSE, the optimum value of the real numbers and the minimum MSE of the proposed estimators are investigated and compared with relevant existing estimators. In addition, the efficiency of all estimators was

evaluated from theoretical and empirical studies, which found that the proposed estimators are always better than the mentioned existing estimators in literature, having the smallest and highest values of MSE and PRE, respectively. Therefore, the proposed estimators are recommended for their practical use in estimating the population means when the auxiliary information is available.

REFERENCES

1. Cochran WG. The estimation of the yields of the cereal experiments by sampling for the ratio of grain to total produce. *J Agric Sci.* 1940;30:262-75.
2. Robson DS. Application of multivariate polykeys to the theory of unbiased ratio-type estimation. *J Am Stat Assoc.* 1957;52: 511-22.
3. Murthy MN. Product method of estimation. *Sankhya.* 1964;26A:69-74.
4. Sisodia BVS, Dwivedi VK. A modified ratio estimator using coefficient of variation of auxiliary variable. *J Indian Soc Agric Stat.* 1981;33:13-8.
5. Pandey BN, Dubey V. Modified product estimator using coefficient of variation of auxiliary variate. *Assam Stat Rev.* 1988;2(2): 64-6.
6. Upadhyaya LN, Singh HP. Use of transformed auxiliary variable in estimating the finite population mean. *Biom J.* 1999;41(5):627-36.

7. Singh GN. On the improvement of product method of estimation in sample surveys. *J Indian Soc Agric Stat.* 2003;56(3):267-75.
8. Singh HP, Tailor R. Use of known correlation coefficient in estimating the finite population mean. *Stat Transit.* 2003;6:555-60.
9. Kadilar C, Cingi H. Ratio Estimators in Simple Random Sampling. *Appl Math Comput.* 2004; 151:893-902.
10. Kadilar C, Cingi H. An improvement in estimating the population mean by using the correlation coefficient. *Hacet J Math Stat.* 2006;35(1):103-9.
11. Singh HP, Tailor R, Kakaran MS. An estimator of population mean using power transformation. *J Indian Soc Agric Stat.* 2004;58(2):223-30.
12. Singh HP, Tailor R. Estimation of finite population mean using known correlation coefficient between auxiliary characters. *Statistica.* 2005;65(4):407-18.
13. Al-Omari AI, Jemain AA, Ibrahim K. New ratio estimators of the mean using simple random sampling and ranked set sampling methods. *Investig Oper.* 2009;302:97-108.
14. Singh HP, Upadhyaya LN, Tailor R. Ratio-cum-product type exponential estimator. *Statistica.* 2009;69(4):299-310.
15. Yan Z, Tian B. Ratio method to the mean estimation using coefficient of skewness of auxiliary variable. In: Zhu R, Zhang Y, Liu B, Editors. *Information Computing and Applications - First International Conference, ICICA 2010; 2010 Oct 15-18; Tangshan, China.* Berlin: Springer, 2010, p. 103-110.
16. Singh HP, Tailor R, Tailor R. Estimation of finite population mean in two-phase sampling with known coefficient of variation of an auxiliary character. *Statistica.* 2012;72(1): 111-26.
17. Subramani J, Kumarapandiyan G. Estimation of population mean using co-efficient of variation and median of an auxiliary variable. *Int J Probab Stat.* 2012;1(4):111-18.
18. Jeelani MI, Maqbool S, Mir SA. Modified ratio estimators of population mean using linear combination of co-efficient of skewness and quartile deviation. *Int J Mod Math Sci.* 2013;6(3):174-83.
19. Jerajuddin M, Kishun J. Modified ratio estimators for population mean using size of the sample, selected from population. *Int J Sci Res Eng Technol.* 2016;2(2):10-6.
20. Khoshnevisan M, Singh R, Chauhan P, Sawan N, Smarandache F. A general family of estimators for estimating population mean using known value of some population parameter(s). *Far East J Math Sci.* 2007;22: 181-91.
21. Yadav SK, Dixit MK, Dungana HN, Mishra SS. Improved estimators for estimating average yield using auxiliary variable. *Int J Math Eng Manag Sci.* 2019;4:1228-38.



การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมักหน่อไม้ด้วยกล้าเชื้อโพรไบโอติก

Development of Fermented Bamboo Shoots with Probiotic Starter Culture

ปาไลดา ตั้งอนรรัตน์* และ เจริญ เจริญชัย

Palida Tanganurat* and Chareon Chareonchai

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: palida_t@mutt.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: December 22, 2021

Revised: May 18, 2022

Accepted: June 2, 2022

Available online: June 13, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.7

Keywords: fermented bamboo shoots, probiotic, starter culture

The objectives of this research were to develop fermented bamboo shoots with probiotic starter *Pediococcus pentosaceus* (MG12) and *Lactobacillus plantarum* (M29). The optimum formula and concentration of starter culture during fermentation time on properties of fermented bamboo shoots the result revealed that the formula that MSG and sugar added showed the highest mean score in term of odor, taste and overall liking ($P \leq 0.05$). Besides, pH of the fermented bamboo shoots was between 3.68-3.89 at the end of fermentation time for 3 days. Then the formula that MSG and sugar added was selected for further investigation. The different concentrations of mixed probiotic starter powder between *Ped. pentosaceus* (MG12) and *Lac. plantarum* (M29) ratios of 1:1 (0, 0.5, 1.0, and 1.5% w/w) were studied. The results revealed that usage of probiotic starter cultures affected L^* value, pH and total acidity (lactic acid). Fermented bamboo shoots inoculated with starter cultures had higher L^* value and total acidity ($P \leq 0.05$), but lower pH than control ($P \leq 0.05$). The sensory evaluation by a 9-point hedonic scale exhibited that 0.5% w/w starter culture received the highest liking score for taste and overall liking. Microbiological analysis

of bamboo shoots Nham indicated that *Salmonella* spp., *Clostridium perfringens*, and *Staphylococcus aureus* were not detected. *Escherichia coli* were < 3 MPN/g. Yeast and mold counts were <10 CFU/g. The survival of probiotic starter cultures in bamboo shoot Nham were more than 6 log CFU/g that complied with probiotic product standards.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ แหนมหน่อไม้หมักด้วยกล้าเชื้อโพรไบโอติก *Pediococcus pentosaceus* (MG12) และ *Lactobacillus plantarum* (M29) หาสูตรที่เหมาะสมและผลของปริมาณของกล้าเชื้อระหว่างการหมักต่อสมบัติของแหนมหน่อไม้ พบว่า สูตรที่เติมผงชูรส และน้ำตาลทราย ได้คะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสสูงที่สุดด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบรวม ($P \leq 0.05$) ขณะที่แหนมหน่อไม้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.68-3.89 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำสูตรที่เติมผงชูรส และน้ำตาลทราย ไปศึกษาต่อโดยใช้ปริมาณ ผงกล้าเชื้อโพรไบโอติก ผสมระหว่าง *Ped. pentosaceus* (MG12) และ *Lac. plantarum* (M29) อัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (0, 0.5, 1.0 และ 1.5% โดยน้ำหนัก) พบว่า กล้าเชื้อโพรไบโอติกส่งผลต่อค่าความสว่าง ค่าความเป็นกรดต่าง และปริมาณกรดแลกติกทั้งหมด แหนมหน่อไม้ที่เติมกล้าเชื้อทำให้ค่าความสว่างและปริมาณกรดทั้งหมดสูงกว่าแต่ค่าความเป็นกรดต่างลดลงกว่าชุดควบคุม ($P \leq 0.05$) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธี 9-point hedonic scale พบว่าการเติมกล้าเชื้อปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนักได้คะแนนความชอบด้านรสชาติ และความชอบรวมสูงที่สุด การวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาของแหนมหน่อไม้ไม่พบ *Salmonella* spp., *Clostridium perfringens* และ *Staphylococcus aureus* ส่วนจำนวน *Escherichia coli* ไม่เกิน 3 MPN/g และยีสต์รำน้อยกว่า 10 CFU/g มีจำนวนโพรไบโอติกที่

มีชีวิตคงเหลือในผลิตภัณฑ์แหนมหน่อไม้มากกว่า 6 log CFU/g ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก

คำสำคัญ: แหนมหน่อไม้ จุลินทรีย์โพรไบโอติก กล้าเชื้อ

บทนำ

หน่อไม้ (Bamboo shoots) เป็นพืชที่ได้รับ ความนิยมในการบริโภค ทั้งในรูปแบบหน่อไม้สด หน่อไม้แห้ง และหน่อไม้ดอง เนื่องจากมีรสชาติอร่อย หาได้ง่ายในฤดูฝน โดยเฉพาะในประเทศในแถบภูมิภาค เอเชียมีการบริโภคหน่อไม้สูงถึง 2 ล้านตันต่อปี หน่อไม้ นับเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจชุมชน และประเทศ ประเทศไทยมีมูลค่าการค้าของผลิตภัณฑ์ หน่อไม้ทั้งแบบสดและแปรรูปประมาณปีละ 1,400 ล้านบาท และส่งออกไปยังต่างประเทศประมาณปีละไม่ต่ำกว่า 1,000 ล้านบาท [1] เมื่อพิจารณาที่คุณค่าทางโภชนาการของหน่อไม้ไม่ผัดแล้ว พบว่าหน่อไม้ไม่ผัดมี ปริมาณของโปรตีน กรดอะมิโน และเส้นใยสูง มีแร่ธาตุ โดยเฉพาะโซเดียมและแคลเซียมอยู่จำนวนมาก สารอาหารที่พบในหน่อไม้ไม่ผัด 100 กรัม ประกอบด้วย พลังงาน 30 kcal น้ำ 91.9 กรัม เถ้า 0.8 กรัม โปรตีน 2.3 กรัม ไขมัน 0.2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 4.8 กรัม ไฟเบอร์ 0.9 กรัม แคลเซียม 49 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 55 มิลลิกรัม เหล็ก 0.3 มิลลิกรัม วิตามินบี 1 (Thiamin) 0.06 มิลลิกรัม วิตามิน บี 2 (Riboflavin) 0.06 มิลลิกรัม วิตามิน บี 3 (Niacin) 0.8 มิลลิกรัม วิตามินซี 11 มิลลิกรัม นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าพบสารต้านอนุมูลอิสระในหน่อไม้อีกด้วย [2]

ปัจจุบันเทคโนโลยีหมักต้องมีต่ออุตสาหกรรมมากขึ้น เนื่องมาจากราคาวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นในช่วงภัยแล้งและประชากรส่วนใหญ่สนใจแปรรูปอาหารให้ใกล้เคียงธรรมชาติให้มากที่สุด ไม่มีการเจือปนของสารเคมีในกระบวนการผลิต และยังเป็นอาหารเพื่อสุขภาพอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันอาหารหมักดองที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภค คือ แหนมเห็ด ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มไส้กรอกกึ่งแห้ง มีคุณค่าทางโปรตีนสูง และมีปริมาณ ไขมันต่ำ [3] เป็นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนามาจากแหนมที่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามแหนมไม้ก็เป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่ยังไม่มีนักวิจัยนำมาผลิตเป็นแหนมหน่อไม้เพื่อเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ปราศจากเนื้อสัตว์

หัวเชื้อหรือกล้าเชื้อบริสุทธิ์ (Starter culture) ในรูปลักษณะที่เป็นเชื้อผงนำมาใช้ได้ง่ายโดยนำเชื้อผงคลุกเคล้ากับวัตถุดิบในการผลิตแหนมในปริมาณที่พอเหมาะก็สามารถผลิตแหนมที่มีคุณภาพดี และใช้เวลาหมักน้อยกว่าการผลิตโดยไม่ใช้เชื้อหรือหมักตามธรรมชาติสำหรับการเลือกใช้เชื้อบริสุทธิ์มาเติมลงในผลิตภัณฑ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณภาพที่ดีกว่า และมีความปลอดภัยสูง มีระยะเวลาการหมักสั้นลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ และมีอายุการเก็บรักษาที่คงทน สำหรับเชื้อแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) เพื่อให้เกิดรสเปรี้ยว และกลิ่นรสเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ *Lactobacillus plantarum* และ *Pediococcus cerevisiae* [4, 8] โดยนำมาใช้ในหลายรูปแบบทั้งเชื้อเดี่ยวและเชื้อผสม เซลล์เปียก (สด) และเซลล์แห้ง (ผง) ใช้ปริมาณ 1-2 % โดยน้ำหนัก

งานวิจัยจะมุ่งเน้นพัฒนาผลิตภัณฑ์แหนมหน่อไม้หมักด้วยกล้าเชื้อโพรไบโอติก และนำมาวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยาและประสาทสัมผัสให้ได้ผลิตภัณฑ์พร้อมรับประทานที่มีความแปลกใหม่ ทั้งยังเสริมด้วยจุลินทรีย์โพรไบโอติก เพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการทำแหนมหน่อไม้

นำหน่อไม้ไฟตงมาสับและหั่นเป็นเส้น ๆ นำหน่อไม้ที่สับแล้วไปต้มจนเดือด เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นแล้วบีบน้ำออก นำส่วนผสมทั้งหมดผสมให้เข้ากันตามแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 อัดใส่ถุง และมัดยางให้แน่น หมักที่อุณหภูมิห้อง 30 - 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 วันหรือมีค่า pH 4.6 โดยทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของแหนมหน่อไม้ที่หมักเป็นเวลา 1, 2 และ 3 วัน ได้แก่

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของแหนมหน่อไม้แต่ละสูตร

ส่วนผสม (%)	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
หน่อไม้สับ	76.5	87	93
ข้าวเหนียว	10	4	2
กระเทียม	10	4	2
เกลือ	2.5	3	2
พริกป่นเกาหลี	1	1	1
น้ำตาลทราย	0	0.5	0
ผงชูรส	0	0.5	0

ที่มา : Praditsrigul N. et al. [5]

วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสีในหน่วย Hunter (L*, a*, b*) วัดค่าความเป็นกรดต่าง pH ด้วยเครื่องวัด pH meter วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด Total soluble solid (TSS) ด้วย Hand refractometer และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory test) ด้วยวิธี 9-point hedonic scale โดยผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน

การเตรียมกล้าเชื้อ

เชื้อเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกที่คัดแยกจากตัวอย่างผักดอง [9] ได้แก่ *Pediococcus pentosaceus* (MG12) และ *Lactobacillus plantarum* (M29) มาเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง MRS

บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการเชื้อโคโลนีเดียวจากอาหารเลี้ยงเชื้อใส่ลงในหลอดที่มีอาหารเหลว MRS ปริมาณ 5 มิลลิลิตร บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงเซลล์ด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที เทสารละลายส่วนใสทิ้ง ทำการล้างเซลล์สองครั้งด้วย saline solution ที่ฆ่าเชื้อแล้ว (9 log CFU/ml) เพื่อนำไปใช้เป็นก้ำเชื้อ โดยถ่ายเชื้อ 5 % (v/w) ลงในน้ำแครอทจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง [6] มาผสมกับสารที่ก่อให้เกิด โฟมแต่ละชนิด คือ เมโทเซลร่วมกับไข่ขาวผงในอัตราส่วน 1:1 นำเข้าเครื่องผสมอาหารเพื่อตีให้เกิดโฟม โดยใช้เครื่องตีแบบหัวตะกร้อใช้เวลาในการตีผสม 20 นาที แล้วกระจายโฟมบนถาด อบที่ 60 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาบดแล้วบรรจุในถุงพอยล์ [7] เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

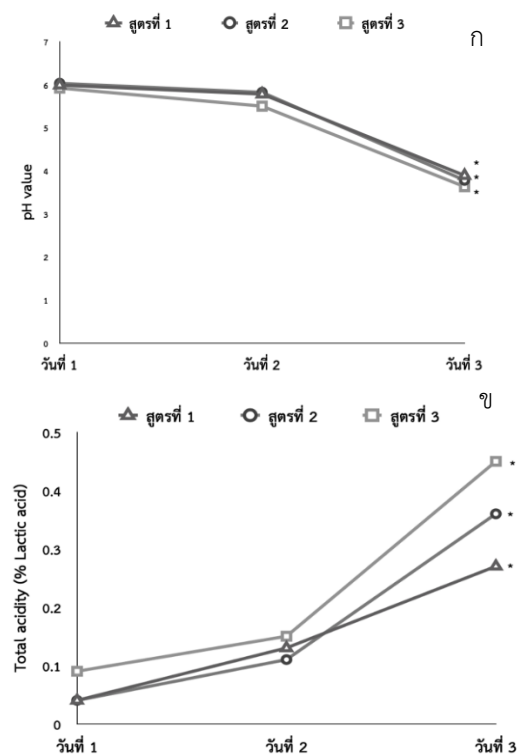
การศึกษาผลของก้ำเชื้อต่อคุณภาพของแฮมหม้อไม้ด้านต่าง ๆ

นำส่วนผสมของแฮมหม้อไม้สูตรที่ได้คะแนนความชอบสูงสุดจากการคัดเลือกสูตรมาเติมก้ำเชื้อผงหมักที่อุณหภูมิห้อง 30 ถึง 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วันหรือมีค่า pH 4.6 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยเติมก้ำเชื้อที่ปริมาณ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5% ของส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ดังนี้ วัดค่า pH ค่า Total soluble solid (TSS) โดยใช้เครื่อง refractometer (Atago, Japan) วัดค่า Titratable acidity (TA) วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสีในหน่วย Hunter ($L^* a^* b^*$) (Minolta CR-10, Japan) และการประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory test) ด้วยวิธี 9-point hedonic scale ผู้ทดสอบชิม จำนวน 30 คน เลือกสูตรแฮมหม้อไม้ที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับมากที่สุดมาตรวจสอบคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ จำนวนแบคทีเรียกรดแลคติก จุลินทรีย์ทั้งหมด *Staphylococcus aureus* ยีสต์และรา *E. coli* และ *Salmonella*

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design, CRD) สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design: RCBD) นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH (ก) และร้อยละของปริมาณกรดแลคติกทั้งหมด (ข) ระหว่างกระบวนการหมักแฮมหม้อไม้แต่ละวัน โดยเครื่องหมาย * แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากการหาสูตรในการทำแฮมหม้อไม้ที่มีคุณภาพและได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมาก

ที่สุด เพื่อเลือกสูตรที่จะนำไปใช้ในการหมักด้วยกล้าเชื้อต่อไป โดยตรวจสอบค่า pH ของหมกหมนอไม้แต่ละสูตร หมักเป็นเวลา 3 วัน แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า ค่า pH ของแต่ละสูตรลดลงจาก 6.03 เป็น 3.63 และมีร้อยละปริมาณกรดแลกติกทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ระหว่าง 0.04-0.45 เมื่อหมักเป็นเวลานานขึ้น สำหรับค่าสี L^* a^* b^* พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) จะมีค่ามากขึ้นเมื่อ pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ค่าสีแดง-เขียว (a^*) และค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 2

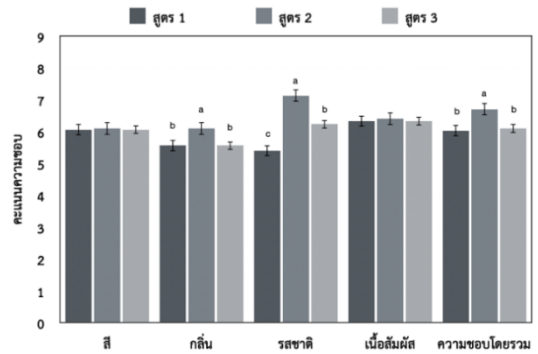
ตารางที่ 2 ค่าสี L^* a^* b^* ของหมกหมนอไม้ระหว่างกระบวนการหมักแต่ละสูตร

สูตร	วันที่	L^*	a^*	b^*
1	1	31.66 ^b ± 0.23	20.49 ^a ± 0.46	36.87 ^a ± 0.42
	2	32.17 ^b ± 0.12	17.88 ^b ± 0.14	30.57 ^b ± 1.61
	3	37.96 ^a ± 0.06	15.60 ^c ± 0.13	26.47 ^c ± 0.51
2	1	30.13 ^a ± 0.10	21.25 ^a ± 0.39	35.57 ^a ± 1.51
	2	31.83 ^b ± 0.52	20.06 ^b ± 0.44	28.96 ^b ± 1.51
	3	33.59 ^c ± 0.24	15.72 ^c ± 0.56	28.64 ^b ± 1.94
3	1	31.13 ^b ± 0.27	20.67 ^a ± 0.75	33.80 ^a ± 0.66
	2	31.29 ^b ± 0.18	17.80 ^b ± 0.56	33.67 ^a ± 0.44
	3	32.92 ^a ± 0.15	14.36 ^c ± 0.48	24.21 ^b ± 1.84

หมายเหตุ a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ในแนวตั้งของค่าสีในแต่ละสูตร

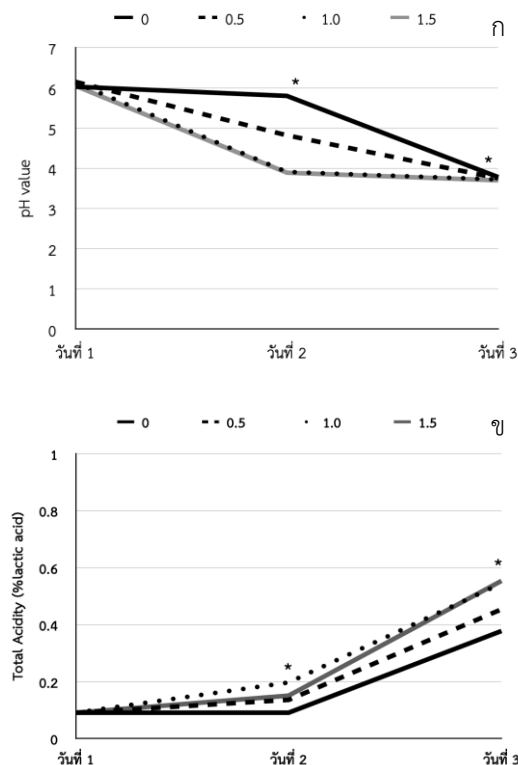
จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของหมกหมนอไม้สูตรต่าง ๆ (รูปที่ 2) พบว่าสูตรที่ 2 มีคะแนนความชอบด้านรสชาติ กลิ่น และความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นคะแนนด้านสีและเนื้อสัมผัส เนื่องจากสูตรที่ 2 ใส่ผงชูรสลงไป 0.5 % เมื่อผงชูรส ละลายน้ำจะแตกตัว

เป็นโซเดียมและกลูตาเมตอิสระซึ่งมีคุณสมบัติในการเพิ่มรสชาติอาหารให้เด่นชัดขึ้น และกลมกล่อมมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ทำการศึกษาสู่การพัฒนาหมกหมนงาฟ้า [5]



รูปที่ 2 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของหมกหมนอไม้แต่ละสูตร โดย a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

นำสูตรที่ 2 ที่มีการเติมผงชูรสและน้ำตาลทรายซึ่งได้รับคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น รสชาติและความชอบโดยรวมมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) มาศึกษาผลของการเติมกล้าเชื้อ *Pediococcus pentosaceus* MG12 และ *Lactobacillus plantarum* M29 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติก [9] ในปริมาณต่าง ๆ ที่ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5% ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพ และจุลินทรีย์ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์หมักต้องเกิดขึ้นได้ 2 สภาวะ คือ การหมักตามธรรมชาติและการหมักด้วยกล้าเชื้อ โดยการหมักตามธรรมชาติจะอาศัยแบคทีเรียที่พบตามธรรมชาติ ซึ่งอาจปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ ส่วนผสมหรือปนเปื้อนมากับเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต แต่การหมักด้วยกล้าเชื้อจะมีการเติมกล้าเชื้อบริสุทธิ์ของแบคทีเรียกรดแลกติกลงไป เช่น *Lac. plantarum*, *Pediococcus cerevisiae*, *P. acidilactici* และ *P. pentosaceus* [3] ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพทั้งด้านสี กลิ่น และรสชาติที่ดี มีความปลอดภัยต่อการบริโภค และเก็บไว้ได้นานขึ้น [10]



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า pH (ก) และร้อยละของปริมาณกรดแลคติกทั้งหมด (ข) ระหว่างกระบวนการหมักหมมหน่อไม้ที่ใช้กล้าเชื้อในปริมาณต่าง ๆ ที่ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5% โดยเครื่องหมาย * แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากรูปที่ 3 พบว่า ค่า pH ของหน่อไม้ที่ใช้กล้าเชื้อในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อมีการเติมกล้าเชื้อมากขึ้น ทำให้ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 2 และ 3 ของกระบวนการหมัก พบว่าหน่อไม้ที่เติมเชื้อบริสุทธิ์ทุกสิ่งทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าหน่อไม้ที่ไม่ได้เติมเชื้อบริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และมีปริมาณกรดแลคติก (%) สูงกว่าหน่อไม้ที่ไม่ได้เติมเชื้อ บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกจากธรรมชาติและที่เติมลงไปสามารถหมักน้ำตาลใน

วัตถุดิบและส่วนผสมเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกได้ [12] สอดคล้องกับงานวิจัยของปรมาภรณ์ และคณะ [13] ศึกษาผลของการใช้กล้าเชื้อในการหมักหน่อไม้โค พบว่าการใช้กล้าเชื้อ *Lactobacillus lactis subsp. lactis* P2 ทำให้หน่อไม้โคมีค่า pH ลดลงมากที่สุดเมื่อหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหมักหน่อไม้ด้วยกล้าเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติก คือ 30 องศาเซลเซียส [3]

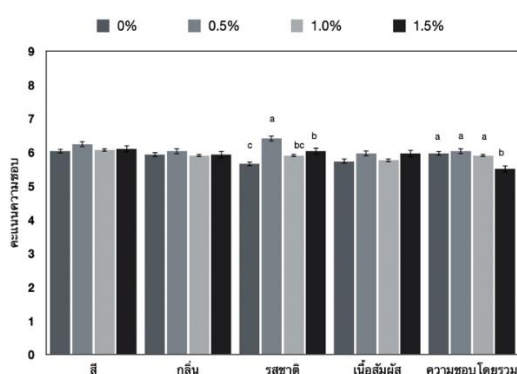
การลดลงของค่า pH ส่งผลต่อรสชาติของหน่อไม้ และช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน รวมถึงจุลินทรีย์ที่ก่อโรค ผลการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ยังเกิดจากการที่เชื้อผลิตสารยับยั้ง เช่น แบคทีเรียโอซิน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยในต่างประเทศมีการใช้ *Lactobacillus sp.* และ *Pediococcus sp.* เป็นกล้าเชื้อทางการค้าในผลิตภัณฑ์หมัก นอกจากนี้ยังมีการใช้กล้าเชื้อ *Micrococcus sp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่รีดิวซ์ไนโตรเจนเป็นไนไตรท์ ส่งผลให้สีของผลิตภัณฑ์มีความคงทนยิ่งขึ้น [5] โดยแบคทีเรียสายพันธุ์กรดแลคติกที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มโฮโมเฟอร์เมนต์-เททีฟ (homofermentative) ที่สามารถผลิตกรดแลคติกจากน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ กลุ่ม *Lactobacilli*, *Pediococci*, Gram-positive catalase-positive cocci และ coagulase-negative staphylococci ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ผลิตกรดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและมีความปลอดภัย [11]

ในการหมักยังพบแบคทีเรียกรดแลคติกชนิดอื่นที่มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งทำให้หน่อไม้มีสีซีด [5] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4 ที่พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ในหน่อไม้จะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการหมักนานขึ้น สำหรับค่า a^* ซึ่งแสดงค่าสีแดง-เขียว และค่า b^* ซึ่งแสดงค่าสีเหลือง-น้ำเงิน พบว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ค่าสี L* a* b* ของแฮมหน่อไม้ด้วยกล้าเชื้อในปริมาณแตกต่างกันที่ระยะเวลาหมัก 3 วัน

ปริมาณกล้าเชื้อ (%)	L*	a*	b*
0	32.22 ^b ± 0.06	18.51 ^a ± 0.21	30.61 ^a ± 0.11
0.5	33.12 ^a ± 0.15	18.00 ^b ± 0.18	29.63 ^b ± 0.13
1.0	33.89 ^a ± 0.73	17.54 ^b ± 0.73	29.24 ^b ± 0.19
1.5	33.46 ^a ± 0.22	17.59 ^b ± 0.18	29.67 ^b ± 0.20

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ในแนวตั้งของแฮมหน่อไม้หมักด้วยกล้าเชื้อในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของแฮมหน่อไม้ระหว่างกระบวนการหมักที่เติมกล้าเชื้อในปริมาณต่าง ๆ กัน โดย a-c ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แฮมหน่อไม้ที่เติมกล้าเชื้อในปริมาณต่าง ๆ ด้วยวิธี 9-point hedonic scale (รูปที่ 4) พบว่าปริมาณกล้าเชื้อส่งผลต่อคะแนนความชอบด้านรสชาติของผลิตภัณฑ์ และความชอบรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยจากการทดลองพบว่าแฮมที่มีการเติมกล้าเชื้อจะมีความเป็นกรด-ด่างและปริมาณกรดทั้งหมดของผลิตภัณฑ์สูงกว่าชุดควบคุม จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากล้าเชื้อที่ 0.5% เหมาะสม ในการผลิตแฮมหน่อไม้ แต่อย่างไรก็ตามยังเป็นช่วงคะแนนความชอบที่ต่ำในระดับชอบเล็กน้อย จึงควรปรับปรุง

สูตรเพื่อเพิ่มคะแนนความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสต่อไป

ในส่วนของคุณภาพทางจุลชีววิทยา ไม่พบยีสต์รา *E. coli* และ *Staphylococcus aureus* ในผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนแฮมเห็ด (มพช.472/2547) รวมทั้งพบว่ามีจำนวนโปรไบโอติกที่มีชีวิตคงเหลือในผลิตภัณฑ์มากกว่า $6 \log \text{CFU/g}$ ตามประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่อง หลักเกณฑ์และแนวทางการปฏิบัติการใช้จุลินทรีย์โปรไบโอติกในอาหาร

สรุปผล

การพัฒนาผลิตภัณฑ์แฮมหน่อไม้ด้วยกล้าเชื้อโปรไบโอติก พบว่าสูตรที่ 2 ได้คะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสสูงที่สุดด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบรวม ($P \leq 0.05$) แฮมหน่อไม้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.68-3.89 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก (3 วัน) จากนั้นศึกษาปริมาณผงกล้าเชื้อที่ต่างกัน พบว่ากล้าเชื้อส่งผลต่อค่าความสว่าง pH และปริมาณกรดทั้งหมด แฮมหน่อไม้ที่เติมกล้าเชื้อ ทำให้ค่าความสว่างและปริมาณกรดทั้งหมดสูง และค่า pH ลดลงเร็วกว่าชุดควบคุม ($P \leq 0.05$) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธี 9-point hedonic scale แสดงว่าการเติมกล้าเชื้อ 0.5% ได้คะแนนความชอบด้านรสชาติ และ

ความชอบรวมสูงที่สุด แหนมหน่อไม้ที่ใช้กล้าเชื้อมีคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของผลิตภัณฑ์แหนม โดยมีจำนวนโพรไบโอติกที่มีชีวิตคงเหลือในผลิตภัณฑ์มากกว่า 6 log CFU/g

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

- Buntod C, Udomkham R, Khampabat P, Prabphai U, Nata W. Development and technology transfer of bamboo shoots slicing machine for food processing. Engineering, Science, Technology and Architecture conference; 2016 Jul 25-26; Dusit princess hotel. Nakhonratchasima; 2016. p. 664-70.
- Chongtham N, Bisht MS, Haorongbam S. Nutritional Properties of Bamboo Shoots: Potential and Prospects for Utilization as a Health Food. Compr Rev Food Sci Food Saf. 2011;10:153-68.
- Kwanmuang P. Effect of temperature on nham fermentation with starter culture. The proceedings of 42nd Kasetsart university annual conference; 2004Feb3-6; Kasetsart University. Bangkok; 2004. p. 339-46.
- Wiriyaicharee P, Rujanakraikarn L, Anutarakum S. [Nham product development using mixed bacterial starter cultures]. Journal of Agriculture. 1995;11(1):69-81. Thai.
- Praditsrigul N, Buasanit A, Namhong T, Pokom S, Jangmongkol S. The product development of fermented grey oyster mushroom (*Pleurotus sajorcaju*). The 1st Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi National Conference; 2016 Jun 22; Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. Phra Nakhon Si Ayutthaya; 2006. p. 480-92.
- Tanganurat P, Prathummuan T. Patchimbut Y. Production lactic acid bacteria starter powder using foam-mat drying. The 6th International conference on fermentation of value-added agricultural products, (Proceeding); 2015. pp. 218-23.
- Anuthed C, Sontipeampun W, Konbanggerd T, Chansangsri P. [Optimum conditions in lemongrass instant powder production by foam-mat drying]. The Journal of KMUTNB. 2010;20(3):524-33. Thai.
- Songsanan P, Charoenrat S. [Effect of lactic acid bacteria as starter cultures on physical, chemical, microbiological, and sensory qualities of soft pork ribs nham]. KRU Science Journal. 2018;46(3):445-54. Thai.
- Tanganurat P, Chareonchai C. Production of pickled mustard by freeze-dried starter isolated from fermented vegetables and fruit and evaluation of its quality. Proceeding of the 29th annual meeting of the Thai society for biotechnology and international

- conference; 2017 Nov 23 – 25; Khon Kaen; 2017. p. FA-23-32.
10. Maneesri J. Fermented food technology. 2nd Edition. Bangkok: Fourface. 2008. pp. 247.
 11. Zhang W, Xiao S, Samaraweera H, Ahn DE. Improving functional value of meat products. Meat Sci. 2010;86:15-31.
 12. Suwannasaksin P, Chantarapapont W. Study effect of addition *Lactobacillus plantarum* TISTR1331, *Lactobacillus fermentum* TISTR937 and commercial starter on quality of Thai fermented sausage (Nham) product. The proceedings of 55th Kasetsart university annual conference; 2017 Jan-Feb 31-3; Kasetsart University. Bangkok; 2017. p. 697-702.
 13. Jedwanna P, Pilasombut K, Limsupwanich R, Swetwivat A, Setthakul J. [Study of quality and microbiology of beef Nham using *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* P2 and Sb2 as starter culture in Nham fermentation]. King Mongkut's Agricultural Journal. 2011;29(3):46-54. Thai.



แนวทางการพัฒนาผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา

Development Approach of Marinade Powder from *Suaeda maritima* for Fish

สายชล ทองคำ^{1*} นภาพันท์ โชคอำนวยพร^{1*} และ ดิณณภพ จุ่มอิน²

Saichon Tongkam^{1*}, Napapan Chokumnoyporn^{1*} and Thinnaphop Chum-in²

¹สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม กรุงเทพฯ 10900

¹Food and Nutrition Division, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University, Bangkok 10900, THAILAND

²Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an, Shaanxi, 710049, CHINA

*Corresponding author e-mail: fonwwa@windowslive.com, pnapan@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: March 21, 2022

Revised: May 23, 2022

Accepted: May 25, 2022

Available online: June 13, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.8

Keywords: *Suaeda Maritima*,

Fish, Marinade powder

This research aims to study and find a guideline for the development of fish seasoning and marinade powder from *Suaeda maritima*. seasoning powder from *Suaeda maritima* for marinating fish. The study was divided into 4 approaches: (1) focus group discussion, (2) questionnaire, (3) raw materials quality analysis of dried *Suaeda maritima* and (4) preliminary acceptance assessment of fish marinating. Results from focus group discussions and questionnaires illustrated that used as the guidelines for the development of fish seasoning and marinade powder from *Suaeda maritima* showed that product should have the natural flavor from herbal ingredients, antioxidants and salt content reduction. It should not have contained monosodium glutamate. This product should be packed in zip lock bags and glass bottles. The amount for this product ranged from 70-100 g/1 package. The quality analysis of raw materials from the drying process, found that dried *Suaeda maritima* contained sodium content 8,680.50 mg /100 g and the antioxidant capacity (Trolox) 1,307.23 (mg eq Trolox/100 g). In addition, the result of consumer acceptance for different fish marinating formulation showed

that consumers accepted fish using marinating with *Suaeda maritima* powder at like slightly to like moderately in all quality attributes: color, odor, taste, texture and overall- preference with the preference scores between 6.1 -7.6. Thus, it is possible to further research for using dried *Suaeda maritima* powder to be applied as the main ingredient of seasoning powder for marinating fish.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับการหมักเนื้อปลา โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 แนวทางได้แก่ (1) การสนทนากลุ่ม (2) การทำแบบสอบถาม (3) การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบชะครามที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง และ (4) การประเมินการยอมรับเบื้องต้นของเนื้อปลาหมักชะคราม ซึ่งผลการสนทนากลุ่ม และการทำแบบสอบถาม พบว่าแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามที่ผู้บริโภคมีความต้องการที่จะซื้อ ผลิตภัณฑ์ควรมีรสชาติตามธรรมชาติของวัตถุดิบสมุนไพรที่ใช้ ผลิตภัณฑ์ไม่ควรมีผงชูรส มีสารต้านอนุมูลอิสระและมีการลดปริมาณเกลือ และผลิตภัณฑ์ผงหมักเมื่อนำมาจำหน่ายควรบรรจุในถุงซิปล็อค และกระปุกแก้ว โดยมีปริมาณในการบรรจุที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์นี้อยู่ในช่วง 70-100 กรัม เมื่อพิจารณาถึงการวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบชะครามที่ผ่านกระบวนการทำเป็นผงจะพบว่าชะครามอบแห้งมีปริมาณปริมาณโซเดียม 8,680.50 มิลลิกรัม/100 กรัม และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Trolox) 1,307.23 (mg eq Trolox/100 g) นอกจากนี้เมื่อนำไปทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคสำหรับการหมักปลาด้วยวิธีต่าง ๆ ยังพบว่าการหมักเนื้อปลาด้วยผงชะคราม ผู้บริโภคให้การยอมรับในช่วงขอบเล็กน้อยจนถึงขอบปานกลาง โดยที่ผู้บริโภคให้ค่าคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมอยู่ในช่วง 6.1 -7.6 คะแนน ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงแนวทางต่าง ๆ ที่ได้รับ

แล้วจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำชะครามมาทำการอบแห้งและบดเป็นผงเพื่อใช้ในการเป็นองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ผงหมักเนื้อปลาต่อไป

คำสำคัญ: ชะคราม เนื้อปลา ผงหมัก

บทนำ

ชะคราม (*Suaeda maritima*) จัดเป็นพืชท้องถิ่นชนิดหนึ่งในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเจริญเติบโตได้ง่ายตามป่าชายเลนที่มีดินเค็มและขึ้น มีลักษณะเป็นพรรณไม้พุ่มเตี้ย ใบสีเขียวอวบน้ำ ใบมีรสเค็มออกดอกตามซอกใบ เมื่อแก่มีสีแดงอมม่วง ชะครามมักนำมาใช้มาปรุงอาหารและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [1-3] โดยปกติสำหรับชะครามที่จะนำมาปรุงอาหารมักเลือกใช้ใบอ่อนในการประกอบอาหาร [1, 3] ชะครามเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ประกอบไปด้วยทั้ง โปรตีน ไขมัน โยอาหาร คาร์โบไฮเดรต วิตามินซี [4-5] นอกจากนี้ชะครามยังถือเป็นพืชสมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ วิตามินซี ฟลาโวนอยด์ เบต้าแคโรทีน และสารประกอบฟีนอลิก [1, 6] และที่สำคัญยังมีการรายงานถึงการนำใบชะครามไปใช้ประโยชน์โดยการสกัดเกลือจากชะครามเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางค์แล้ว ด้วยการสกัดชะครามน้ำหนัก 400 กรัม เกลือ 250 กรัม ต่อปริมาณน้ำ 1,000 มิลลิลิตร จะมีปริมาณเกลือที่ได้ 301.17 กรัม [7]

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ชะครามในการหมักปลาสดสดเค็มเค็มเดียว โดยสายชล ทองคำ และ ศิริวิมล สายเวช [8] ด้วยการเปรียบเทียบกับหมักด้วยวิธีต่าง ๆ คือ หมักด้วยเกลือ ดอกเกลือ และดอก

ชะคราม จากนั้นจึงทำการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภค พบว่าปลาสดแช่เค็มเดียวที่ใช้ใบชะครามร้อยละ 90 ผู้บริโภคยอมรับคุณลักษณะด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เกลือร้อยละ 30 และดอกเกลือร้อยละ 90 แต่การยอมรับด้านสีต่ำกว่าการใช้เกลืออื่น ๆ สิ่งที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ผู้วิจัยได้พบว่าปลาที่หมักด้วยชะครามให้กลิ่นรสเอกลักษณ์เฉพาะตัว ซึ่งเป็นกลิ่นหอมเฉพาะตัวและเป็นเอกลักษณ์ของชะคราม ด้วยเหตุนี้ทำให้คณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นความโดดเด่นของชะครามดังกล่าว จึงได้คิดที่จะต่อยอดงานวิจัยดังกล่าวโดยการทำเป็น “ผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา” ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาหมักเนื้อปลาสดและขยายองค์ความรู้พัฒนาเป็นชนิดอื่น ๆ โดยยังคงให้รสชาติที่อร่อยและเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว สามารถเป็นนำไปหมักปลาสดได้ง่าย พกพาได้สะดวก ท้ายที่สุดผลการวิจัยนี้ นำไปสู่การช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับพืชท้องถิ่นและช่วยส่งเสริมรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่ง ทั้งนี้การหมักด้วยน้ำชะครามมีความเค็มที่ช่วยในการถนอมเนื้อปลาที่มีโปรตีนสูงไว้รับประทานได้นาน ซึ่งความเค็มในใบชะครามนั้นยังช่วยลดการเน่าเสียของเนื้อปลา และช่วยลดกลิ่นคาวของปลาสดลงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาผงหมักชะครามสำหรับใช้หมักเนื้อปลา โดยทำการสำรวจความคิดเห็นกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคทั่วไป แม่บ้าน และผู้ประกอบการผลิตปลาสดตากแห้ง ทั้งการสนทนากลุ่ม การทำแบบสอบถาม การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบชะครามที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง และการประเมินการยอมรับเบื้องต้นของเนื้อปลาหมักชะคราม จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาช่วยในการพัฒนาสูตรผงหมักที่เหมาะสมสำหรับการหมักปลาทากแห้งต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มตัวอย่าง

การสร้างแนวความคิดในการพัฒนาผงหมักชะคราม ได้ข้อมูลจากการศึกษา 2 ส่วนได้แก่ การสนทนา

กลุ่ม และการใช้แบบสอบถาม ซึ่งทางผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองโดยทำการสนทนากลุ่มกับผู้บริโภคเป้าหมาย 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแม่บ้านที่มีอายุอยู่ในช่วง 20-50 ปี และผู้ประกอบการที่ทำปลาสดตากแห้งในจังหวัดสมุทรสาครทั้งเพศชายและหญิง ที่มีอายุอยู่ในช่วง 20-50 ปี จำนวนผู้เข้าร่วมสนทนา 8 คน/กลุ่ม

ส่วนการใช้แบบสอบถามจะเป็นชนิดปลายปิด โดยมีกลุ่มเป้าหมาย คือ กลุ่มแม่บ้านและผู้บริโภคทั่วไป เนื่องจากผู้วิจัยไม่ทราบจำนวนประชากรที่แน่นอนในการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง จึงได้สุ่มตัวอย่างตามสูตรการคำนวณแบบไม่ทราบจำนวนประชากร (Infinite Population) โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำให้ได้ขนาดตัวอย่างจากการคำนวณ 385 ตัวอย่าง และได้มีการสำรองเผื่อไว้ร้อยละ 5 เท่ากับ 20 ตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเก็บตัวอย่างจริงผู้วิจัยสามารถเก็บได้ถึงจำนวน 410 คน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเก็บแบบสอบถามบางตัวอย่างอาจจะไม่สมบูรณ์ สำหรับการสุ่มตัวอย่างจะใช้รูปแบบสะดวก (Convenience Sampling) และวิธีการเก็บข้อมูลแบบสอบถามในครั้งนี้มีการดำเนินการ 2 รูปแบบ คือ การนำแบบสอบถามไปแจกยังกลุ่มตัวอย่างโดยตรง และการตอบแบบสอบถามในระบบออนไลน์

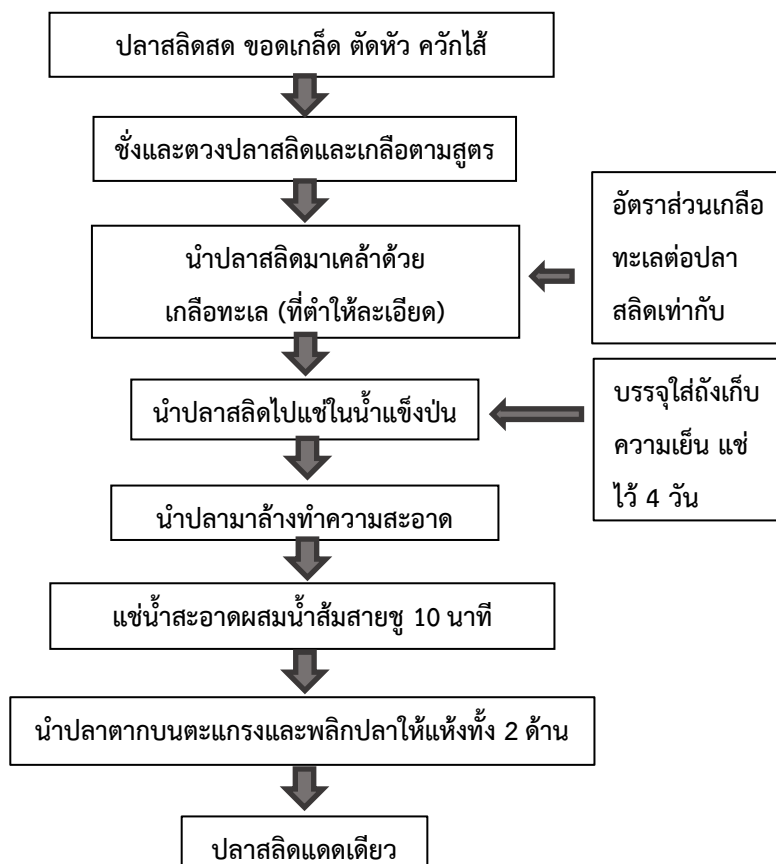
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) แบบสอบถามแนวความคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสมุทร
- 2) แบบประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามโดยใช้ 9-point hedonic scale test

การวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) การหาค่าร้อยละ
- 2) การหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
- 3) วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ การวิเคราะห์

ความแปรปรวน ANOVA โดยมีแผนการทดลองแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดย RCBD (Randomized Complete Block Design) และ กำหนดค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Turkey's test และ



รูปที่ 1 กรรมวิธีในการหมักพลาสติกแดดเดียวสูตรหมักเกลือ

การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ขยะพลาสติกที่เก็บเกี่ยวในจังหวัดสมุทรสาคร ส่วนที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของขยะพลาสติกที่ผ่านการทำแห้ง ซึ่งวิธีการทำแห้งได้ดัดแปลงวิธีการจากสกุลตรา คำชู [9] โดยทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์คุณภาพสมบัติทางเคมีได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย ความชื้น และเถ้าด้วยวิธี AOAC [10] การคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธี Calculation by difference การวิเคราะห์ค่าพลังงานทั้งหมดโดยใช้เครื่อง Bomb

calorimeter การวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมด้วยวิธี Inductively coupled plasma (ICP) [11] และการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Free radical scavenging assay) [1]

การประเมินการยอมรับเบื้องต้นของเนื้อปลาหมักขยะพลาสติก

การประเมินการยอมรับเบื้องต้นของเนื้อปลาหมักจำนวน 3 สูตรได้แก่ สูตรหมักเกลือ (สูตรควบคุม) สูตรหมักน้ำขยะพลาสติกและสูตรหมักผงขยะพลาสติก ซึ่งวิธีการเตรียมตัวอย่างและการประเมินการยอมรับมีดังนี้

1. สูตรหมักเกลือ ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างเนื้อปลาหมักสูตรหมักเกลือสำหรับใช้ในการ

ประเมินการยอมรับมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1

2. สูตรหมักน้ำชะคราม ใบชะคราม 1000 กรัม น้ำ 300 กรัม สำหรับวิธีการหมักปลาด้วยน้ำชะครามใช้วิธีการตามรายงานการวิจัยของ สายชล ทองคำ และ ศิริวิมล สายเวช [8] ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมชะครามโดยนำชะครามมาเด็ดใบและเลือกแต่ใบสด ทำความสะอาดพักให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นนำชะครามปั่นก่อนหมักปลาสดโดยใช้อัตราส่วนปลาสดต่อใบชะคราม 10:1.5 หมักทิ้งไว้ 1 คืน ใส่ น้ำแข็งป่น แช่ไว้ในถังน้ำแข็งนำไปตากแดดตามระยะเวลา และในขณะที่ตากแดดจะทำการกลับปลาทั้ง 2 ข้าง

3. สูตรหมักผงชะคราม ผู้วิจัยได้ทดลองสูตรผงหมักชะครามเบื้องต้น ซึ่งเป็นสูตรผงหมักชะครามแบบดั้งเดิม โดยมีอัตราส่วนผงชะครามอบแห้ง 2.5 กรัม ต่อปลาสดจำนวน 100 กรัม คลุกหมักปลาเป็นเวลา 30 นาที

4. การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบชิม กำหนดขนาดของเนื้อปลาแต่ละชิ้นเท่ากับ 4 เซนติเมตร (ปลาสด 1 ตัวจะทำการตัดแบ่งจำนวน 3 ชิ้น) ทำการหมักด้วยสูตรต่าง ๆ จากนั้นทำให้เนื้อสุก [12] โดยวิธีการทอดด้วยการควบคุมปริมาณของเนื้อปลาให้มีปริมาณเท่ากัน ซึ่งการทอดใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลานาน 10 นาที นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อเนื้อสัตว์ที่ผ่านการหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา ในการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคใช้สเกลแบบ 9-point hedonic scale กับผู้บริโภคจำนวน 30 คน ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีเลขรหัสกำกับไว้ด้วยรหัสเลขสุ่ม 3 ตัว จากนั้นผู้รับการทดสอบให้คะแนนความชอบตามรหัสของตัวอย่างอาหารซึ่งเป็นระดับความชอบ 1-9 [13, 14] วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ RCBD (Randomized Complete Block Design) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Turkey's test และ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) กำหนดค่านัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการสนทนากลุ่ม

จากการสอบถามในหัวข้อการรับรู้ ทักษะคิด และพฤติกรรมที่มีต่อผลิตภัณฑ์ผงหมักตามท้องตลาดของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มรู้จักผลิตภัณฑ์ผงหมักคิดเป็นร้อยละ 100 โดยที่ผู้บริโภคในกลุ่มของแม่บ้านเคยใช้ผงหมักในการทำอาหารประเภททอดผัดและนึ่ง ซึ่งความถี่ในการใช้ผงหมักในการประกอบอาหารในกลุ่มของผู้ประกอบการมีการใช้ผงหมักในการประกอบอาหารนาน ๆ ครั้ง ส่วนในกลุ่มของแม่บ้านมีการใช้ผงหมักอย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ทั้ง 2 กลุ่มสนใจหากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมัก

ผลการตอบแบบสอบถาม

ในส่วนของการสร้างแนวความคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะคราม ที่ได้ข้อมูลจากการใช้แบบสอบถามผลดังตารางที่ 1-3 โดยมีผู้ให้ข้อมูลตอบแบบสอบถามแบ่งเป็นเพศหญิงและเพศชายจำนวน 410 คน ซึ่งพบว่ามีอายุในการตอบแบบสอบถามสูงสุดอยู่ในช่วง 21-30 ปี คิดเป็นร้อยละ 67.81 ด้านระดับการศึกษาพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 79.51 ในด้านรายได้ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีรายได้อยู่ในช่วง 10,001-20,000 บาท สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 55.37

จากข้อมูลตารางที่ 1 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศหญิงจำนวน 314 คน ร้อยละ 76.59 เพศชายจำนวน 96 คน ร้อยละ 23.41 ซึ่งอายุ 21-30 ปี จำนวน 278 คน ร้อยละ 67.81 มีอายุอยู่ในช่วง 41-50 ปี จำนวน 73 คน ร้อยละ 17.80 มีอายุมากกว่า 51 ปี จำนวน 30 คน ร้อยละ 7.32 มีอายุอยู่ในช่วง 31-40 ปี จำนวน 29 คน ร้อยละ 7.07 ระดับการศึกษาปริญญาตรีจำนวน 326 คน ร้อยละ 79.51 ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรีขึ้นไป จำนวน 43 คน ร้อยละ 10.49 ระดับการศึกษาอนุปริญญาหรือเทียบเท่า จำนวน 36 คน ร้อยละ

8.78 อนุปริญญาหรือเทียบเท่า จำนวน 36 คน ร้อยละ 20,001-30,000 บาท จำนวน 73 คน ร้อยละ 17.80
 8.78 ระดับการศึกษาประถมศึกษา จำนวน 3 คน ร้อยละ รายได้ตั้งแต่ 30,000 บาทขึ้นไป จำนวน 66 คน ร้อยละ
 0.73 ระดับการศึกษามัธยมศึกษาหรือเทียบเท่า จำนวน 16.10 และรายได้ต่ำกว่า หรือเท่ากับ 10,000 บาท
 2 คน ร้อยละ 0.49 และมีรายได้ในช่วง 10,001- 20,000 บาท จำนวน 44 คน ร้อยละ 10.73
 บาท จำนวน 227 คน ร้อยละ 55.37 รายได้ในช่วง

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายที่ทำแบบสอบถามในการพัฒนาผงหมักชะครามโดยใช้แบบสอบถาม

ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม	จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ ชาย	96	23.41
หญิง	314	76.59
รวม	410	100.00
อายุ ไม่เกิน 20 ปี	-	-
21 – 30 ปี	278	67.81
31 – 40 ปี	29	7.07
41 – 50 ปี	73	17.80
มากกว่า 51 ปี	30	7.32
รวม	410	100.00
ระดับการศึกษา ประถมศึกษา	3	0.73
มัธยมศึกษาหรือเทียบเท่า	2	0.49
อนุปริญญาหรือเทียบเท่า	36	8.78
ปริญญาตรี	326	79.51
สูงกว่าปริญญาตรีขึ้นไป	43	10.49
รวม	410	100.00
รายได้ ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10,000 บาท	44	10.73
10,001-20,000 บาท	227	55.37
20,001-30,000 บาท	73	17.80
30,000 บาทขึ้นไป	66	16.10
รวม	410	100.00

สำหรับตารางที่ 2 ในด้านความถี่ของการซื้อผงหมักเพื่อใช้ประกอบอาหารพบว่า กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายมีความถี่ในการซื้อผงหมักที่วางจำหน่ายตามท้องตลาดของผู้บริโภคจำนวน 1-2 ครั้ง/เดือน สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 53.66 โดยที่สถานที่ร้านค้าที่มักจะเข้าไป

ซื้อผลิตภัณฑ์ คือ ห้างสรรพสินค้ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50.37 ทั้งนี้หากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักที่ผลิตโดยมีส่วนผสมของเครื่องสมุนไพร ผู้บริโภคเป้าหมายให้ความสนใจสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 92.68

ตารางที่ 2 ผลการตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผลิตภัณฑ์ผงหมักของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย

ข้อมูลทั่วไปของผลิตภัณฑ์ผงหมัก	จำนวน (คน)	ร้อยละ
1. ท่านซื้อผลิตภัณฑ์ผงหมักเพื่อใช้ใน		
การประกอบอาหารบดเคี้ยวใน 1 เดือน		
น้อยกว่า 1 ครั้ง	88	21.46
1 – 2 ครั้ง	220	53.66
3 – 4 ครั้ง	65	15.85
5 - 6 ครั้ง	15	3.66
มากกว่า 6 ครั้ง	22	5.37
อื่นๆ	-	-
รวม	410	100.00
2. สถานที่ร้านค้าที่ท่านมักจะเข้าไปหาซื้อผลิตภัณฑ์		
ผงหมักเป็นประจำ		
ร้านขายของชำทั่วไปและตลาด	59	14.39
ห้างสรรพสินค้า	208	50.73
ร้านสะดวกซื้อ	139	33.90
ร้านขายของฝาก	-	-
อื่นๆ	4	0.01
รวม	410	100.00
3. ท่านสนใจผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสเพื่อสุขภาพ		
ที่ผลิตโดยมีส่วนผสมของเครื่องสมุนไพร		
เช่น ชะคราม พริก ข่า ตะไคร้ หรือไม้		
สนใจ	380	92.68
ไม่แน่ใจ	29	7.07
ไม่สนใจ	1	0.24
รวม	410	100.00

จากตารางที่ 3 ผลการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสเพื่อสุขภาพสำหรับเนือปลาจากชะครามของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย พบว่าแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสเพื่อสุขภาพสำหรับเนือปลาจากชะคราม ผู้บริโภคเห็นว่าผลิตภัณฑ์ควรมีรสชาติตามธรรมชาติของวัตถุดิบสมุนไพรที่ใช้ถึงร้อยละ 52.63 โดยที่ควรมีการปรุงแต่ง

กลิ่นรสของอาหารไทยถึงร้อยละ 24.56 แนวทางที่ผู้บริโภคคิดว่าจะเหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสจากชะครามเพื่อสุขภาพ ได้แก่ ไม่มีผงชูรส มีสารต้านอนุมูลอิสระและการลดปริมาณเกลือ คิดเป็นร้อยละ 41.46, 26.34 และ 19.03 ตามลำดับ เนื่องจากผู้บริโภคคำนึงถึงสุขภาพจากการบริโภคอาหารและมีความรู้ในการเลือกผลิตภัณฑ์อาหารที่มีสารก่อให้เกิดผล

ต่อสุขภาพและการป้องกันโรคไม่เกิดจากปริมาณที่กำหนดในการบริโภคอาหารจากกรรมอนามัย กระบวนการสาธารณสุขเกี่ยวกับการบริโภคอาหารที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายโดยการไม่รับประทานอาหารให้หลากหลายเพื่อให้ได้สารอาหารที่ครบถ้วนตามปริมาณที่ร่างกายต้องการ ผู้บริโภคเสนอแนะบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในการบรรจุผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสเพื่อสุขภาพสำหรับเนื้อปลาจากชะคราม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่เป็นถุงซิปล็อค

ซองทึบและกระปุกแก้ว ปริมาณในการบรรจุที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์นี้อยู่ในช่วง 70- 100 กรัม และราคาที่ผู้บริโภคสามารถซื้อผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสจากชะครามสำหรับเนื้อปลาต่อ 1 บรรจุภัณฑ์อยู่ในช่วง 21-40 บาท โดยที่หากมีผลิตภัณฑ์ผงหมักปรุงรสจากชะครามสำหรับเนื้อปลา ออกมาจำหน่ายผู้บริโภคจะซื้อผลิตภัณฑ์นี้ถึงร้อยละ 81.00

ตารางที่ 3 ผลการตอบแบบสอบถามด้านข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลาของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย

ข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา	จำนวน (คน)	ร้อยละ
1. ท่านอยากให้ผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา มีกลิ่นรสแบบใด		
กลิ่นตามธรรมชาติของวัตถุดิบสมุนไพรที่ใช้	216	52.63
กลิ่นของชะครามที่โดดเด่น	79	19.30
กลิ่นของอาหารไทย เช่น ต้มยำ พริกเผา	101	24.56
อื่นๆ	14	3.51
รวม	410	100.00
2. ท่านอยากให้ผลิตภัณฑ์ผงหมักมีรสชาติแบบไหน		
รสชาติตามธรรมชาติของวัตถุดิบสมุนไพรที่ใช้	329	80.36
รสชาติหวาน	22	5.36
รสชาติเปรี้ยว	22	5.36
รสชาติเค็ม	37	8.93
รวม	410	100.00
3. ท่านอยากให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลาเพื่อสุขภาพอย่างไร		
ลดเกลือ	78	19.03
ลดหวาน	54	13.17
มีสารต้านอนุมูลอิสระ	108	26.34
ไม่มีผงชูรส	170	41.46
รวม	410	100.00
4. ลักษณะของบรรจุภัณฑ์ที่ท่านต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ผงหมักชะคราม		
สำหรับเนื้อปลา	15	3.57
บรรจุภัณฑ์เป็นซองใส	51	12.50
บรรจุภัณฑ์เป็นซองทึบ	146	35.71

ข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงหมักขยะสำหรับเนื้อปลา	จำนวน (คน)	ร้อยละ
บรรจุภัณฑ์เป็นถุงซิปล็อค	73	17.86
บรรจุภัณฑ์เป็นกระปุกแก้ว	73	17.86
บรรจุภัณฑ์เป็นขวดแก้วขนาดเล็ก		
รวม	410	100.00
5. ท่านอยากให้ผลิตภัณฑ์ผงหมักขยะสำหรับเนื้อปลาบรรจุในบรรจุภัณฑ์ปริมาณเท่าไรต่อการซื้อในแต่ละครั้ง		
30-50 กรัม	15	3.57
70-100 กรัม	183	44.64
500 กรัม	37	8.93
1 กิโลกรัม	176	42.86
อื่นๆ	-	-
รวม	410	100.00
6. ราคาที่ท่านสามารถซื้อผลิตภัณฑ์ผงหมักขยะสำหรับเนื้อปลาต่อ 1 บรรจุภัณฑ์		
10-20 บาท	95	23.21
21-40 บาท	212	51.79
41-60 บาท	66	16.07
100 บาท	37	8.93
รวม	410	100.00
7. ถ้าหากมีผลิตภัณฑ์ผงหมักขยะสำหรับเนื้อปลาออกมาจำหน่ายท่านจะซื้อบริโภคหรือไม่		
ซื้อ	329	81.00
ไม่ซื้อ	-	-
ไม่แน่ใจ	81	11.00
รวม	410	100.00

ผลการสนทนากลุ่ม

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบขยะ เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารที่สำคัญที่มีอยู่ของขยะก่อนนำไปใช้ในการพัฒนาผงหมักขยะสำหรับเนื้อปลา โดยลักษณะทางกายภาพของทั้งใบขยะสด ใบขยะอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และใบ

ขยะอบแห้งบดที่ผ่านการบดให้เป็นผงเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในผงหมัก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 ตามตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขยะที่ผ่านการทำแห้งด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการทำผงหมักพบว่า ขยะที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมี ปริมาณ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า และความชื้นเท่ากับ

17.26 44.75 2.98 30.96 และ 4.05 กรัม/100 กรัม ส่วน ปริมาณโซเดียม 8,680.50 มิลลิกรัม/100 กรัม เมื่อ วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ชะครามแห้งดังกล่าวมีค่าความสามารถในการต้านอนุมูล อีสาร (Trolox) 1,307.23 (mg eq Trolox/100 g) เมื่อ เทียบจากผลการศึกษาในก่อนหน้าของ Sudjaroen Y. [15] พบว่ามีค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกัน โดยส่วนที่แตกต่าง กันคาดว่ามาจากฤดูกาลกับพื้นที่เก็บเกี่ยว [16]

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการทำ แห้งชะครามโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการตากแดด มีขั้นตอนในการเตรียมชะครามก่อนการทำแห้ง

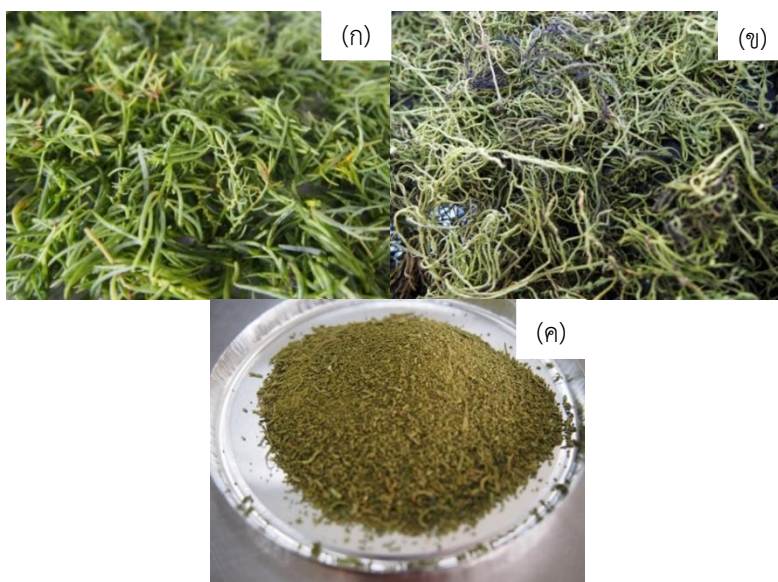
เช่นเดียวกับการใช้ตู้อบลมร้อน โดยนำชะครามใส่ถาดตาก แดดเป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมง ช่วงเวลาในการตาก แดดตั้งแต่ 9.00 -16.00 น. ซึ่งการตากแดดจัดเป็นวิธีการ หนึ่งของกระบวนการทำให้อาหารแห้งที่ช่วยในการถนอม อาหาร โดยการทำให้น้ำระเหยออกไปจากอาหารจนได้ ผลิตภัณฑ์ที่แห้งสามารถเก็บไว้ได้นาน ซึ่งการทำแห้งถือ ว่าเป็นการลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีจะ มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การตากแดดเป็นวิธีการ ดั้งเดิมที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง ประหยัด ค่าใช้จ่าย แต่ก็ใช้เวลานานในการทำแห้งและต้อง ระวังอันตรายของการปนเปื้อนจากฝุ่นหรือแมลง

ตารางที่ 4 คุณภาพของวัตถุดิบชะครามที่ผ่านการอบแห้ง

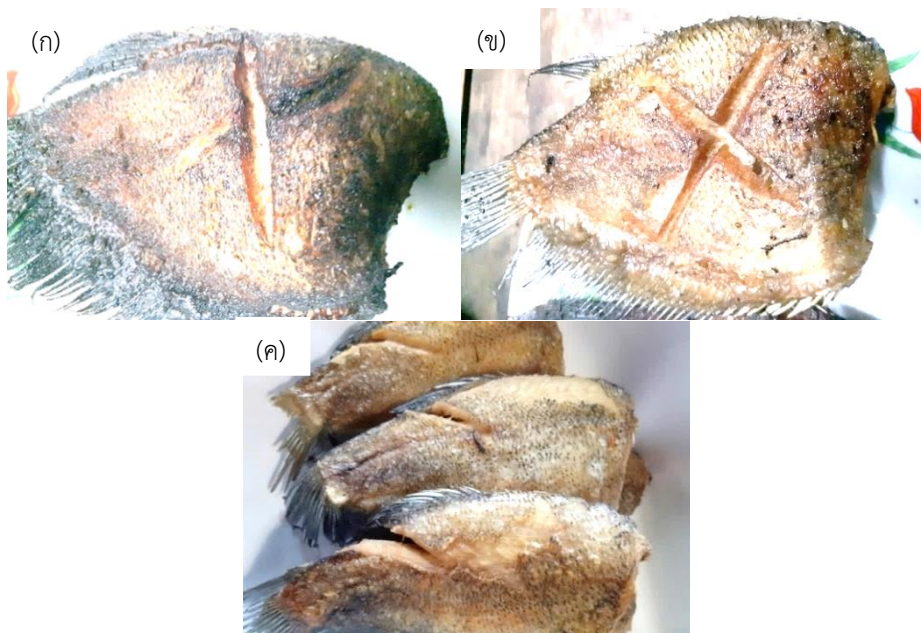
ส่วนของชะคราม	องค์ประกอบทางโภชนาการ (ร้อยละ)				
	โปรตีน	คาร์โบไฮเดรต	ไขมัน	เถ้า	ความชื้น
ใบชะครามสด ^a	2.96	2.60	0.66	NA	NA
ใบชะครามสด ^b	3.46	2.18	0.15	NA	NA
ใบชะครามแห้ง ^c	12.96	29.36	2.26	12.70	NA
ใบชะครามแห้ง ^d	17.26	44.75	2.98	30.96	4.05
ใบชะครามแห้งผ่านการคั้นรูป ^e	1.71	4.65	0.66	NA	91.22

ที่มา : ^a [4] , ^b [5], ^c [15], ^d [17], ^e [18]

NA คือไม่มีค่ารายงาน



รูปที่ 2 ลักษณะของชะคราม (ก) ใบชะครามสด (ข) ใบชะครามอบแห้ง และ (ค) ใบชะครามอบแห้งบด



รูปที่ 3 ปลาสดที่ทอดที่ผ่านขั้นตอนการหมักด้วย (ก) เกลือ (ข) น้ำชะคราม และ (ค) ชะครามผง

ตารางที่ 5 คุณภาพของวัตถุดิบชะครามที่ผ่านการอบแห้ง

สูตรหมักเกลือ สูตรหมักน้ำชะคราม	ค่าคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะ				
	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
สูตรหมักเกลือ	6.7±1.4 ^b	6.6±1.3 ^b	6.9±1.3 ^a	7.1±1.4	7.0±0.3
สูตรหมักน้ำชะคราม	6.5±1.3 ^b	7.5±1.2 ^a	7.2±1.3 ^a	7.5±1.3	7.2±0.4
สูตรหมักผงชะคราม	7.6±1.3 ^a	7.2±1.4 ^a	6.1±1.2 ^b	7.1±1.4	7.3±0.3

หมายเหตุ: N=30

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} non significant ($p > 0.05$)

สำหรับผลการยอมรับของเนื้อปลาที่มีการหมักชะครามด้วยวิธีต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งจะเห็นว่า เนื้อปลาที่ใช้สูตรหมักผงชะครามมีค่าคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะอยู่ในช่วง 6.1-7.6 คะแนน โดยที่มีค่าคะแนนความชอบด้านสี (7.6 คะแนน) สูงกว่าสูตรอื่น ส่วนค่าคะแนนความชอบในด้านกลิ่น (6.1 คะแนน) ต่ำกว่าสูตรอื่น อย่างไรก็ตามค่าคะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของเนื้อปลาที่หมักด้วยผงชะครามมีค่าคะแนนที่ไม่แตกต่างจากเนื้อปลาสูตรหมักด้วยเกลือซึ่งเป็นสูตรควบคุมและเนื้อปลาสูตรหมักด้วยน้ำชะคราม

ผลการวิเคราะห์แนวทางที่เป็นไปได้สำหรับการพัฒนาผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลา

จากผลการศึกษาและผลการทดลองงานวิจัยนี้พบว่า มีแนวทางในการพัฒนาผงหมักชะครามสำหรับเนื้อปลาดังรายละเอียดต่อไปนี้

การสนทนากลุ่ม

1. ผลิตภัณฑ์ผงหมักชะครามที่ทำการพัฒนาควรมีลักษณะเป็นผง มีส่วนผสมของเครื่องเทศ สมุนไพร ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับสุขภาพ เช่น สมุนไพรที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ เครื่องเทศที่ช่วยในการเพิ่มกลิ่นรสให้กับ

ผลิตภัณฑ์ เป็นต้น โดยกลุ่มผู้สนทนาระบุว่าผลิตภัณฑ์ควรมีรสชาติที่โดดเด่นและเป็นเอกลักษณ์

2. ผลิตภัณฑ์ผงหมักจะควรมีการลดปริมาณเกลือในสูตร ลดน้ำตาลในสูตร ไม่ใส่วัตถุกันเสีย หรือวัตถุเจือปนอาหาร และการไม่ใช้ผงชูรส

3. ปัจจัยที่มีหลักที่ผู้สนทนามีส่วนในการตัดสินใจหากมีการผลิตผงหมักจะควรมี คือ ปัจจัยด้านชนิดของวัตถุดิบและส่วนประกอบ รสชาติ คุณค่าทางโภชนาการ สี สัน ยี่ห้อ ราคา อายุการเก็บรักษา การส่งเสริมการขาย ความปลอดภัยในการบริโภค บรรจุภัณฑ์ ความสามารถในการละลายความรู้สึกแปลกใหม่ กระแสนิยมและความสะดวกในการซื้อผลิตภัณฑ์

4. รูปแบบการจำหน่ายของผงหมักควรอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่ซื้อได้ในตลาด ร้านสะดวกซื้อหรือซูเปอร์มาร์เก็ต ได้แก่ ลักษณะบรรจุภัณฑ์แบบซองพลาสติก ของพอยล์ ขวดหรือกระปุกแก้ว ขวดพลาสติก กล่องกระดาษ กระป๋อง

การทำแบบสอบถาม

1. แนวทางการผลิตผลิตภัณฑ์ผงหมักจะควรมีสำหรับเนื้อปลาจากการทำแบบสอบถามมีความสอดคล้องกับการสัมภาษณ์และสนทนากลุ่ม คือ ผลิตภัณฑ์ผงหมักจะควรมีจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของสมุนไพรที่มีกลิ่นเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง ในขณะเดียวกันควรเป็นผงหมักเพื่อสุขภาพ เช่น การลดความเค็มลงหรือความหวานลง ไม่มีผงชูรสเป็นส่วนประกอบ และมีสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น

2. รูปแบบบรรจุภัณฑ์ที่ผู้บริโภคสนใจ คือ ควรเป็นถุงซิปล็อค ซองทึบ และกระปุกแก้ว โดยมีปริมาณในการบรรจุที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์นี้อยู่ในช่วง 70-100 กรัม

การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบจะควรมีผ่านกระบวนการทำแห้ง

1. จากการวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบจะควรมีผ่านกระบวนการทำแห้งพบว่า จะควรมีเป็นพืชผักที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และมีปริมาณเกลือที่เป็น

องค์ประกอบค่อนข้างสูง ในขณะเดียวกันก็มีสารต้านอนุมูลอิสระเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งที่จะนำจะควรมีมาผลิตเป็นผงหมักจะควรมีสำหรับเนื้อปลา ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงหมักที่มีความสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค กล่าวคือ ปริมาณเกลือที่มีค่อนข้างสูงในจะควรมีสามารถใช้ทดแทนเกลือได้ ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นเฉพาะตัวตามการรายงานของสายชล ทองคำ และศิริวิมล สายเวช [8] และมีสารต้านอนุมูลอิสระ 1,307.23 (mg eq Trolox/100 g) ตามการรายงานของสายชล ทองคำ และคณะ [17] ซึ่งหากนำจะควรมีมาผลิตเป็นผงหมักจะควรมีเพื่อใช้หมักเนื้อปลา ผลิตภัณฑ์ผงหมักที่ได้สอดคล้องกับการสัมภาษณ์และสนทนากลุ่มและการทำแบบสอบถามก่อนหน้านี้

2. การเลือกเทคโนโลยีในการอบแห้งเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งต่อการคงอยู่ขององค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ดังนั้นการเลือกวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมจะทำให้ผงจะควรมีมีองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางโภชนาการในปริมาณที่สูง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการอบแห้ง ก็อาจจะแลกมาด้วยต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ผงหมักจะควรมีมีราคาแพงตามด้วย

การยอมรับของผู้บริโภค

1. ในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทดลองการยอมรับของผู้บริโภค เพื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค โดยการเปรียบเทียบการหมักปลาทั้ง 3 สูตร ตามการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งทำให้ได้แนวทางในการพัฒนาผงหมักจะควรมีที่เป็นเอกลักษณ์เพิ่มเติม โดยการใช้ผงจะควรมีอบแห้ง

2. ทำศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสัดส่วนจะควรมีที่เหมาะสม หรือการเพิ่มสมุนไพร การใส่เครื่องปรุงอื่นๆ เพิ่มเติมเข้าไปในผงหมัก เพื่อทำให้เกิดการยอมรับของผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น

สรุปผล

จากการศึกษาแนวทางในการพัฒนาผงหมัก
 ชะครามสำหรับเนื้อปลาทั้ง 4 แนวทางในงานวิจัยนี้ ทำให้เมื่อพิจารณาถึงแนวทางที่ได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการพัฒนาสูตรผงหมัก
 ชะครามเพิ่มเติมได้อีกในหลายด้าน คือ ใบชะครามมี
 ปริมาณโซเดียม ซึ่งสามารถใช้แทนเกลือ
 บางส่วนได้ดี และปลาทอดยังมักกลิ่นเอกลักษณ์ที่หอม
 เฉพาะตัว ในขณะที่เดียวกันชะครามยังมีสารที่มี
 คุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ปลาที่หมัก
 ด้วยน้ำชะครามและผงชะครามยังได้รับการยอมรับจาก
 ผู้บริโภคเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อพิจารณาแนวทางทั้งหมด
 ที่ได้จึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งที่ในการผลิตผงหมัก
 ชะครามสำหรับเนื้อปลาได้ และหากสามารถผลิตผง
 ชะครามได้สำเร็จคาดว่าจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของ
 พืชผักพื้นบ้านได้อีกทางหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทางสถาบันวิจัย
 และพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษมที่ได้
 สนับสนุนงบประมาณปี 2562 ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Kaewduangdee N, Insombat N. [The study of antioxidant properties and products processing from *Suaeda maritima*]. Adv Sci J. 2012;12(2):107-20. Thai.
2. Pornpitakdamrong A. [Development of pickled seablite (*Suaeda maritima*) for side dishes]. The 6th Academic Meeting National and International conference (Speed Up Research Toward World Class University). 2015 Apr 28-29; Suan Sunandha Rajabhat University. Bangkok: Suan Sunandha Rajabhat University; 2015. p. 651-8. Thai.
3. Chaiburannont Y. [Product development of spaghetti enriched with *Suaeda maritima*]. [Master's thesis]. Bangkok: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon; 2017. Thai.
4. Sangray R, Thongngamdee S, Inyoo A. [Study of Seablite to construct science laboratory direction for prathomsuksa 6 students]. JSSR. 2015;6(1):101-20. Thai.
5. Sudjaroen Y. [Evaluation of ethnobotanical vegetables and herbs in Samut Songkram province]. Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok, 2015. Thai.
6. Chuenarom V, Kerdchoechuen O, Laohakunjit N. [Antioxidant capacity and total phenolics of plant extract from annual Seablite (*Suaeda maritima*)]. Agricultural Sci J. 2010; 41(3/1):621-4. Thai.
7. Soteyome T, Sakulyunyongsuk N, Matra S, Jaroenrat J. Oral rehydration salts of *Suaeda Maritima*. The 9 th Rajamangala University of Technology National Conference (Creative RMUT and Sustainable Innovation for Thailand 4.0). 2017 Aug 7-9; IMPACT Arena. Bangkok: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon; 2017. p. 72-9. Thai.
8. Tongkam S, Saywech S. [Development of gourami marinated in *Suaeda Maritima*]. Bangkok: Institute of Research and Development; 2017. Thai.

9. Kumchoo S. [Cracker from mixed flour and dried Seablite (*Suaeda maritima*)]. The 6th Academic Meeting National and International conference (Speed Up Research Toward World Class University). 2015 Apr 28-29; Suan Sunandha Rajabhat University. Bangkok: Suan Sunandha Rajabhat University; 2015. p. 513-23. Thai.
10. AOAC. Official Method of Analysis of AOAC International. USA: AOAC International; 2019.
11. Wilailux C. [Development of reduced sodium salt frankfurter] [Master's thesis]. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2010. Thai.
12. Ammawat S, Ammawat W, Satsadee T. [Development of core, crown, peel and stem proteases products from pineapple]. Bangkok: National Research Council of Thailand (NRCT); 2014. Thai.
13. Peryam DR, Pilgrim PJ. Hedonic scale method of measuring food preference. Food Tech. 1957;11:9-14.
14. Boonsean S, Boonbai N, Poonyim S, Sirisubjareon A, Ngamnikom P, Surin S. [Development of Healthy Brownie from Three Colored Beans]. JARST. 2021;20(1):30-9. Thai.
15. Sudjaroen Y. Evaluation for nutritive values and antioxidant activities of dried seablite (*Suaeda maritima*). Sci Res Essays, 2015;10 (9):306-12.
16. Choi SC, Lim SH, Kim SH, Choi DG, Kim JG, Choo YS. Growth and solute pattern of *Suaeda maritima* and *Suaeda asparagoides* in an abandoned salt field. JEE. 2012;35: 351–8.
17. Tongkam S, Chokumnoyporn N, Chum-in T. [Development of fish seasoning and marinade powder from *Suaeda maritima*]. Bangkok: Institute of Research and Development; 2020. Thai.
18. Pornpitakdamrong A, Sudjaroen Y. Seablite (*Suaeda maritima*) product for cooking, Samut Songkram Province. Thailand. FNS. 2014;5(9):850-6.



การทอรรีแฟกชันเหง้ามันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง

Torrefaction of Cassava Rhizome to Produce High-Grade Solid Biofuels

จารุณี เข้มพิลลา^{1*} และ ปุมินทร์ คงโต²

Jarunee Khempila^{1*} and Pumin Kongto²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University, Mueang District, Mahasarakham 44000, THAILAND

²Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai District, Songkhla 90110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: March 17, 2022

Revised: May 17, 2022

Accepted: May 31, 2022

Available online: June 14, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.9

Keywords: cassava rhizome, biomass fuel, torrefaction, mass yield

This research studied solid fuel production from cassava rhizome by torrefaction technology to enable its use in the energy sector. Cassava rhizomes (CR) were treated at a temperature range of 250–300 °C under a nitrogen atmosphere. The residence time was 30 minutes. The solid products were characterized in terms of their fuel properties and functional groups, including mass and energy yield, energy densification, ash content, ultimate analysis, and calorific value. In addition, the functional groups of organic compounds were identified by the Fourier transform infrared spectroscopy technique, and the Van Krevelen diagram was used for comparisons of the fuel properties with coal. The results indicated that pretreatment using torrefaction had a significant impact on the quantity and physicochemical properties of the solid product. The torrefied-CR at 300 °C had the lowest mass yield (47.6%), energy yield (66.4%), and content of oxygen (22.0%), however, resulting in the highest calorific value (24.81 MJ/kg), energy densification (1.4), and content of carbon (62.51%). The calorific value of solid

products ranged from 18 to 24 MJ/kg, showing an increase of 6% to 39% compared to the raw biomass. The peak of C–O and C=O stretching in hemicellulose began to disappear at temperatures above 275 °C. When the torrefaction temperature was increased to 300 °C, the ash content slightly increased from 6.18% to 8.76%. Moreover, the oxygen-to-carbon and hydrogen-to-carbon ratios of solid products decreased to become close to lignite coal. The results indicated torrefaction is a pretreatment method for converting cassava rhizome into high-grade biofuel.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยเทคโนโลยีทอร์รีแฟกชันเพื่อนำมาใช้งานในภาคพลังงาน โดยปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิในช่วง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงและหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์แข็ง ได้แก่ ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน ความหนาแน่นพลังงาน ปริมาณเถ้า องค์ประกอบแบบละเอียด และค่าความร้อน นอกจากนี้ยังระบุหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และใช้แผนภาพ Van Krevelen เปรียบเทียบสมบัติด้านเชื้อเพลิงกับถ่านหิน ผลวิจัยพบว่าการปรับสภาพด้วยทอร์รีแฟกชันส่งผลต่อปริมาณและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์แข็งอย่างมีนัยสำคัญ เหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละผลได้เชิงมวล (47.6) ผลได้พลังงาน (66.4) และปริมาณออกซิเจน (22.0) ต่ำที่สุด แต่มีค่าความร้อน (24.81 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) ความหนาแน่นพลังงาน (1.4) และร้อยละปริมาณคาร์บอน (62.51) สูงที่สุด ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าในช่วง 18 ถึง 24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ถึง 39 เมื่อเทียบกับชีวมวลดิบที่อุณหภูมิสูงกว่า 275 องศาเซลเซียส เริ่มไม่ปรากฏพบการสั่นแบบยืดของพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ของคาร์บอน-ออกซิเจน ในเอมิเซลลูโลส ปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

จากร้อยละ 6.18 เป็น 8.76 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ยิ่งกว่านั้นสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอน ของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าลดลงใกล้เคียงถ่านหินลิกไนต์ ผลวิจัยบ่งชี้ว่าทอร์รีแฟกชันเป็นวิธีปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลังให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพคุณภาพสูงได้

คำสำคัญ: เหง้ามันสำปะหลัง เชื้อเพลิงชีวมวล ทอร์รีแฟกชัน ผลได้เชิงมวล

บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลหลากหลายประเภทสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยชีวมวลที่มีศักยภาพได้แก่ แกลบ พางข้าว ชานอ้อย ซึ่งข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ไม้ยางพารา เป็นต้น โดยเฉพาะพืชเศรษฐกิจประเภทมันสำปะหลัง ภายหลังกระบวนการเพาะปลูก เก็บเกี่ยวและแปรรูปก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งในส่วนที่เกิดจากกระบวนการปอกหัวมันนั้นคือ เปลือก (Peels) และส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูก เช่น ลำต้น (Stalk) และเหง้า (Rhizome) โดยเหง้าเป็นส่วนของลำต้นแข็งที่ติดกับหัวมันสด ซึ่งทั้งสามส่วนนี้ไม่สามารถใช้ประโยชน์หรือแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้ เกษตรกรจึงมักทิ้งลำต้นและเหง้าไว้ในพื้นที่ปลูกและเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เมื่อพิจารณาผลผลิตมันสำปะหลังในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2559-2562 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรวมทั้งประเทศประมาณ 30.89 ล้านตัน สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิต

(Residue to Product Ratio, RPR) ของเปลือก ลำต้น และเห้งน้ำมันสำปะหลัง มีค่าเป็น 0.25 0.062 และ 0.112 ตามลำดับ [1] ถึงแม้ค่า RPR ของเปลือกจะสูงกว่าเห้งแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนต่ำ (Low heating value: LHV) พบว่าเปลือกมีค่าความร้อน 1.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 67 โดยน้ำหนัก) ขณะที่เห้งน้ำมันมีค่าความร้อน 5.49 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 59.4 โดยน้ำหนัก) ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่า สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิตรวมกับค่าความร้อนและปริมาณผลผลิตเฉลี่ย พบว่าเห้งน้ำมันสำปะหลังมีศักยภาพด้านพลังงานมากกว่าเปลือก 14.83 กิกะจูล หรือคิดเป็นร้อยละ 72.87 ซึ่งการนำเห้งน้ำมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปของแข็งเพื่อเผาไหม้โดยตรงนั้นมีข้อดีหลายประการ อาทิ ความชื้นในชีวมวล ซึ่งหากชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าความร้อนเนื่องจากต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลไปเพื่อระเหยความชื้น อีกทั้งความชื้นในชีวมวลก่อให้เกิดเขม่าควันในขณะเผาไหม้ นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาขณะกักเก็บเห้งน้ำมันสำปะหลังไว้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นในการนำเห้งน้ำมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงนิยมปรับปรุงคุณภาพหรือเปลี่ยนรูป เช่นการนำมาผลิตถ่านอัดแท่งใช้แทนฟืนในระดับครัวเรือน ซึ่งเห้งน้ำมันสำปะหลังแห้งมีค่าความร้อนระหว่าง 18.5-23.7 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [1, 2] เมื่อผลิตเป็นถ่านอัดแท่งส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงขึ้นเป็น 20.15 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [3] เทียบได้กับค่าความร้อนของไม้ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 17.9-20.5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [4]

ส่วนการนำเห้งน้ำมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานระดับอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงให้ใกล้เคียงถ่านหินเพื่อที่จะสามารถเผาไหม้ร่วมหรือทดแทนการใช้ถ่านหินได้โดยพึ่งพากระบวนการทางเคมีความร้อน ดังการศึกษาของ Shariff และคณะ [5] ซึ่งปรับปรุงคุณภาพเห้งน้ำมัน

สำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow-Pyrolysis) โดยดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวมีค่าสูงขึ้นร้อยละ 26.35 แต่ผลได้เชิงมวล (ผลิตภัณฑ์ของแข็ง) มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 30-37 ส่วน Rueangsarn และคณะ [6] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast-Pyrolysis) ของเห้งน้ำมันสำปะหลังเช่นกันพบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิดคือ ไบโอออยล์ (Bio-oil) ไบโอแก๊ส (Biogas) ไบโอชาร์ (Biochar) ร้อยละ 57-59 14-20 และ 23-28 ตามลำดับ ถึงแม้การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงขึ้นแต่ต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง และได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งน้อยกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพเพื่อคงเหลือผลได้เชิงมวลให้ได้มากที่สุดควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส จึงนำมาซึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงคือ กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10-120 นาที ในสภาวะปราศจากออกซิเจน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้มีปริมาณคาร์บอนค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น อีกทั้งสัดส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน และไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ [7] ส่วนการปรับปรุงสมบัติของเห้งน้ำมันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันได้มีการศึกษาโดย Nakason และคณะ [8] ซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งร้อยละ 50.21-91.39 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับเห้งน้ำมันสำปะหลังก่อนปรับปรุง บ่งชี้ได้ว่าการให้ความร้อนที่เหมาะสมควรมีอุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส [9] แต่ผลได้เชิงมวลจะมีค่าลดลงน้อยกว่าร้อยละ 50 เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูงขึ้น [10]

ที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าเหง้ามันสำปะหลังเป็นเศษวัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ได้มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในรูปของฟืนและถ่านอัดแท่งใช้ในครัวเรือน ส่วนการปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งในการนำไปใช้งานร่วมกับถ่านหิน พบว่าการปรับปรุงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก จึงนำมาซึ่งการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพบข้อสรุปบางประการคือ การให้ความร้อนควรดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 องศาเซลเซียส และไม่ควรสูงเกินกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมิมีค่าต่างกันมากถึง 50 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและสมบัติของชีวมวลทอรรีไฟด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพการเป็นเชื้อเพลิงแข็งของเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันในระดับห้องปฏิบัติการในช่วงอุณหภูมิที่แคบลงโดยแต่ละเงื่อนไขมีความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นละ 25 องศาเซลเซียส นั่นคือ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที เพื่อให้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ เคมี และพลังงานของชีวมวลเหง้ามันสำปะหลังทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วิธีดำเนินงานวิจัย

การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการวิจัยคือ เหง้ามันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 5 จากบ้านสวนมอน ตำบลหนองโน อำเภอเมืองจังหวัดมหาสารคาม ซึ่งเป็นเหง้าที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยว ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากนำเหง้ามันสำปะหลังสดมาลดขนาดด้วยเครื่องสับหยาบแล้วนำไปลดความชื้นด้วยแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ จากนั้นลดขนาดด้วยเครื่องสับหยาบอีกครั้ง ก่อนจะบดละเอียดและร่อน

แยกด้วยตะแกรงขนาด 18 เมช (Mesh) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 จากนั้นบดตัวอย่างชีวมวลเพื่อลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบรรจุใส่ถุงกันความชื้นสำหรับการทดลองและวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งเมื่อนำชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังดิบมีความชื้นและเถ้า ประมาณร้อยละ 9.63 และ 9.18 โดยน้ำหนัก ขณะที่มีความร้อนสูงประมาณ 17.79 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ประมาณร้อยละ 44.56 6.10 1.26 และ 41.90 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 1 ชีวมวลเหง้ามันสำปะหลังดิบ

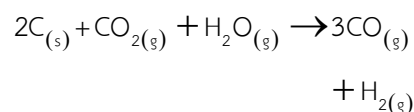
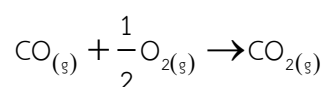
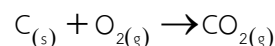
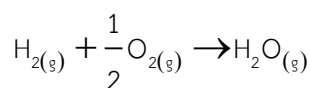
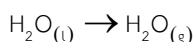
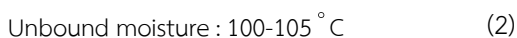
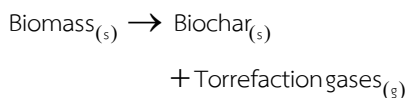
ตารางที่ 1 สมบัติของเหง้ามันสำปะหลังดิบ

สมบัติ	เหง้ามันสำปะหลังดิบ
ความชื้น (wt.%, as received)	9.63±0.26
ปริมาณเถ้า (wt.%, dry basis)	6.18±0.15
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	17.79±0.04
องค์ประกอบแบบละเอียด (wt.%, dry basis)	
C	44.56±0.09
H	6.10±0.10
N	1.26±0.01
O*	41.90±0.34

* คำนวณจากผลต่าง (C + H + N + O + Ash = 100%)

การปรับปรุงชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน

งานวิจัยนี้ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลด้วยกระบวนการเคมีความร้อนที่อุณหภูมิ 250-275 และ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการทอรรีแฟกชัน [12] ดังสมการที่ (1) ถึง (6) เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณความชื้น ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส ความชื้นที่เกาะเกี่ยวที่ผิวของชีวมวลจะเกิดการระเหย เมื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลถึงช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบอินทรีย์ในชีวมวล พบว่าได้ผลิตภัณฑ์หลัก 2 ประเภท คือ ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) และแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรเจน (H_2)



กระบวนการทอรรีแฟกชันในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะอับอากาศ มีขั้นตอนเริ่มจากการชั่งชีวมวลตัวอย่าง 20 กรัม ด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม นำตัวอย่างใส่ในปฏิกรณ์ทรงกระบอก แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ควบคุมอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนดังรูปที่ 2 โดยต่อท่อไนโตรเจนเข้ากับปฏิกรณ์เพื่อแทนที่อากาศที่อยู่ภายในผ่านตัวกระจายแก๊สไนโตรเจนเพื่อให้สัมผัสชีวมวลได้ทั่วถึง ซึ่งควบคุมอัตราการไหล 1 ลิตรต่ออนาที ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลยี่ห้อ Dwyer ประเทศสหรัฐอเมริกา และต่อท่อทางออกของก๊าซและสารระเหยที่เกิดจากกระบวนการทอรรีแฟกชันที่ด้านบนของเตาเผา ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการทอรรีแฟกชัน เตาเผาอุณหภูมิสูงให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อยู่ในปฏิกรณ์ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที [13] ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา คือ 250 องศาเซลเซียส เตาเผาจะให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติเพื่อกองอุณหภูมิให้คงที่จนกระทั่งครบ 30 นาที [14] ปิดเตาเผาแล้วปล่อยให้ปฏิกรณ์เย็นตัวลงภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างบรรจุลงในถุงกันความชื้นและชั่งมวลผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้ทันที บันทึกค่าเป็นมวลของชีวมวลแห้งน้ำหนักสำหรับหลังจากการปรับสภาพด้วยทอรรีแฟกชันหรือเรียกว่า เหน้แห้งน้ำหนักหลังทอรรีไฟด์เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงต่อไป แต่ละเงื่อนไขการทดลองทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งหรือมากกว่าเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลแล้วจึงทำซ้ำตามกระบวนการเดิมที่อุณหภูมิ 275 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การวิเคราะห์สมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์

1. ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงาน

ผลได้เชิงมวล (Mass yield, MY) คือผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทอรีแฟกชัน คำนวณได้จากสมการที่ (7) [15] เมื่อ MY คือ ผลได้เชิงมวล (เปอร์เซ็นต์) m คือ มวลของชีวมวล (กรัม) และ ตัวย่อ ‘raw’ และ ‘tor’ แทน เหน้้ำมันสำปะหลังดิบและ เหน้้ำมันสำปะหลังทอรีไฟด์ ตามลำดับ ส่วนผลได้พลังงาน (Energy yield, EY) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ได้เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพเหน้้ำมันสำปะหลังซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลได้เชิงมวลและค่าความร้อน คำนวณได้จากสมการที่ (8) [15] เมื่อ CV คือ ค่าความร้อนของเหน้้ำมันสำปะหลัง (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification, ED) บ่งบอกถึงความหนาแน่นของพลังงานเมื่อเทียบกับชีวมวลก่อนปรับปรุงคุณภาพ คำนวณได้จากสมการที่ (9) [15]

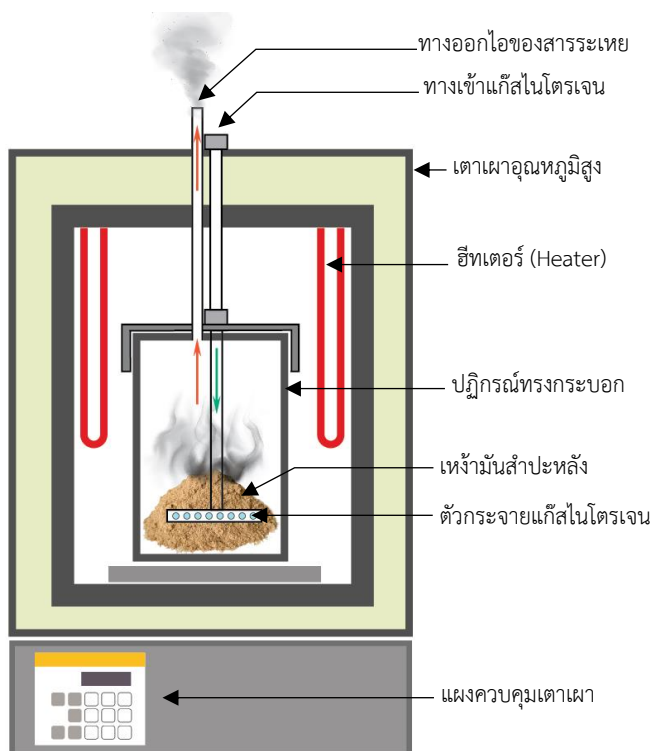
$$MY(\%) = \frac{m_{tor}}{m_{raw}} \times 100 \quad (7)$$

$$EY(\%) = MY \times \frac{CV_{tor}}{CV_{raw}} \quad (8)$$

$$ED = \frac{EY(\%)}{MY(\%)} \quad (9)$$



รูปที่ 2 เตาเผาและชุดปฏิกรณ์ในกระบวนการทอรีแฟกชัน



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของกระบวนการทอรีแฟกชัน

2. องค์ประกอบแบบละเอียด

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer ยี่ห้อ ThermoScientific รุ่น FLASH 2000 ประเทศอิตาลี ตามมาตรฐาน ASTM D5373-16 ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของธาตุต่าง ๆ ความชื้นและเถ้า ผลการทดสอบที่ได้แสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

3. เถ้า

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D 3174-12 ทำได้โดยเผาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง ซึ่งเถ้ามันสำปะหลังที่บดละเอียด 1 กรัม (± 0.5 มิลลิกรัม) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำถ้วยกระเบื้องพร้อมตัวอย่างมาเผาในเตาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากอุณหภูมิห้องถึง 500 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และเพิ่มอุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ภายในชั่วโมงที่ 2 จากนั้นเผาชีวมวลตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณเถ้าได้จากสมการที่ (10)

$$\text{Ash}(\%) = \frac{m_{\text{ash}}}{m_{\text{raw}}} \times 100 \quad (10)$$

4. ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (calorific value, CV) ของชีวมวลคำนวณได้จากสมการเอนโทรปีของ Friedl และคณะ [16] ดังสมการที่ (11) ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุ คาร์บอน (Carbon: C) ไฮโดรเจน (Hydrogen: H) ออกซิเจน (Oxygen: O) และไนโตรเจน (Nitrogen: N) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแบบละเอียด เมื่อ C , H , และ N คือ ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้งของ

คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในเห้ง้ามันสำปะหลังและเห้ง้ามันสำปะหลังทอรัไฟต์

$$CV = 3.55C^2 - 232C - 2230H + 51.2C * H + 131N + 20600 \quad (11)$$

สมการของ Friedl สร้างจากข้อมูลชีวมวลจำนวน 122 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 42.6-50.5 ไฮโดรเจนเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 5.3-6.3 [16] และมีไนโตรเจน คลอรีน กำมะถัน ในปริมาณ น้อยกว่าร้อยละ 3 เมื่อพิจารณาตารางที่ 1 พบว่าเห้ง้ามันสำปะหลังดิบมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนร้อยละ 44.56 และ 6.10 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าเฉลี่ยดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นการเลือกใช้สมการของ Friedl ในการทำนายค่าความร้อนของเห้ง้ามันสำปะหลังจึงมีความถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากมีค่าปริมาณองค์ประกอบอยู่ในขอบเขตของตัวอย่างที่ Friedl และคณะนำมาศึกษา

5. หมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ในเห้ง้ามันสำปะหลังและเห้ง้ามันสำปะหลังทอรัไฟต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One ที่ ช่วงเลขคลื่น 4000-400 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงอินฟราเรดกลาง (Middle Infrared) แสงในช่วงนี้จะมีผลโดยตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ของหมู่ฟังก์ชันในชีวมวลทำให้เกิดเป็นแถบสัญญาณแสดงความสัมพันธ์ของช่วงความถี่กับการส่งผ่านของแสงอินฟราเรดเข้าสู่เครื่องวัดในรูปของสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างในการวิจัยคือ ชีวมวลบดละเอียดในรูปของผง ดังนั้นจึงเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีจานโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr disc) โดยบดชีวมวล

ตัวอย่างร่วมกับผง KBr [17] เพื่อช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดีและขนาดเล็กมากพอที่จะไม่เกิดการกระเจิงแสง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

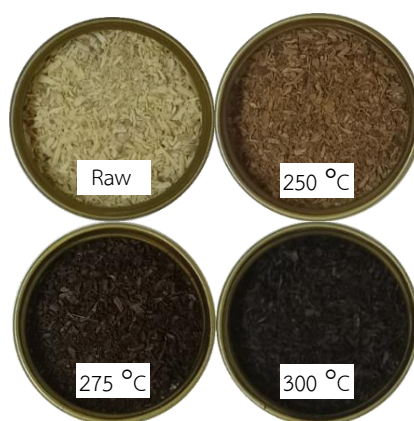
กลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 กลุ่ม คือ เหน้้ำมันสำปะหลังดิบ และเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส โดยมีตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิ และมีตัวแปรอิสระ ได้แก่ ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน และปริมาณเถ้า ดังนั้นจึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way analysis of variance, One-way ANOVA) ซึ่งเป็นสถิติอนุมานที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป อีกทั้งสถิติดังกล่าวนี้มีความแกร่ง (Robust) ต่อการแจกแจงที่ไม่เป็นโค้งปกติของตัวแปรอิสระอันเนื่องมาจากกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก [18-19] ภายหลังวิเคราะห์ความแปรปรวนและเมื่อพบว่ามีความแตกต่างของค่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 คู่ จึงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระนั้น ๆ โดยใช้สถิติการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธีของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบที่มีจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มเท่ากันและจำนวนกลุ่มที่นำมาเปรียบเทียบมีไม่มากนัก โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics ช่วยในการคำนวณวิเคราะห์

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สมบัติทางกายภาพ

สีของชีวมวลเหน้้ำมันสำปะหลังและเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ภายหลังได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า สีของชีวมวลเหน้้ำมันสำปะหลังมีแนวโน้มเข้มขึ้นตามอุณหภูมิทอร์รีไฟด์จากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม และดำ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์แข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหลักทางเคมี

ของชีวมวล นั่นคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [20] โดยความร้อนส่งผลให้เกิดการสลายพันธะไฮโดรเจนและคาร์บอน การทำลาย (Disruption) พันธะไฮโดรเจน พันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) พันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีคือการแตกออกของพอลิเมอร์ (Depolymerization) และการเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ของเฮมิเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีปริมาณคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) สูงขึ้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mamvura และคณะ [21] ที่ศึกษากระบวนการทอร์รีแฟกชันของ marula seeds และ blue gum wood ในช่วงอุณหภูมิ 275-300 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชีวมวลมีสีเข้มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ชีวมวลเปลี่ยนสีจากน้ำตาลเป็นน้ำตาลเข้มตามลำดับ นอกจากสีของชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่เปลี่ยนไปแล้วยังส่งผลให้เกิดการสลายความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอะซิติกในปริมาณมาก [21]



รูปที่ 4 เหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบแบบละเอียด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของเหน้้ำมันสำปะหลังและเหน้้ำมันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ปรากฏดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเหน้้ำมันสำปะหลังดิบและ

เหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจนและไฮโดรเจน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แข็งที่ได้มีปริมาณออกซิเจนลดลง ในขณะที่คาร์บอนมีปริมาณสูงขึ้น การทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีองค์ประกอบออกซิเจนต่ำที่สุด (ร้อยละ 21.85) และมีคาร์บอนสูงที่สุด (ร้อยละ 62.51) โดยน้ำหนัก การลดลงของปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลมากที่สุด ความร้อนในกระบวนการทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ จากนั้นเกิดการฟอร์มตัวได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของของเหลวและก๊าซ ประสิทธิภาพการลดลงของออกซิเจนในผลิตภัณฑ์แข็งจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มการก่อกวนของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ [22]

ปริมาณเถ้าและค่าความร้อน

ผลการคำนวณค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเหง้ามันสำปะหลังและเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความร้อนประมาณ 17.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakason และคณะ [23] ที่ศึกษาการผลิตไบโอชาร์จากเหง้ามันสำปะหลังและรายงานค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังมีค่า 17.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เมื่อทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 250 เป็น 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เป็น 18.87 21.49 และ 24.81 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.07 20.79 และ 39.46 เมื่อเทียบกับเหง้ามันสำปะหลังก่อนปรับสภาพ การปรับสภาพทางความร้อนด้วยเทคโนโลยีทอร์รีแฟกชันนอกจากส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นแล้วนั้น ยังส่งผลให้ปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์แข็งมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกันคือ เมื่ออุณหภูมิของการทอร์รีแฟกชันเพิ่มขึ้นเป็น 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากร้อยละ 6.18 เป็นร้อยละ 6.50 6.70 และ 8.92 ตามลำดับ เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้ามากกว่าจะมีค่าความร้อนน้อยกว่าจึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในปริมาณมากขึ้นเพื่อให้ได้พลังงานที่เท่ากัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lieskovský และคณะ [24] ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้เพียงร้อยละ 1 ทำให้ค่าความร้อนมีค่าลดลง 0.11 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อีกทั้งทำให้ต้นทุนในการจัดการเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องออกแบบห้องเผาไหม้ให้มีระบบรวบรวมเถ้าออกจากห้องเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามกระบวนการทอร์รีแฟกชันส่งผลให้ปริมาณความชื้นและออกซิเจนลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงตัวและคาร์บอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน และเถ้าของเหง้ามันสำปะหลังดิบและเหง้ามันสำปะหลังทอร์รีไฟด์

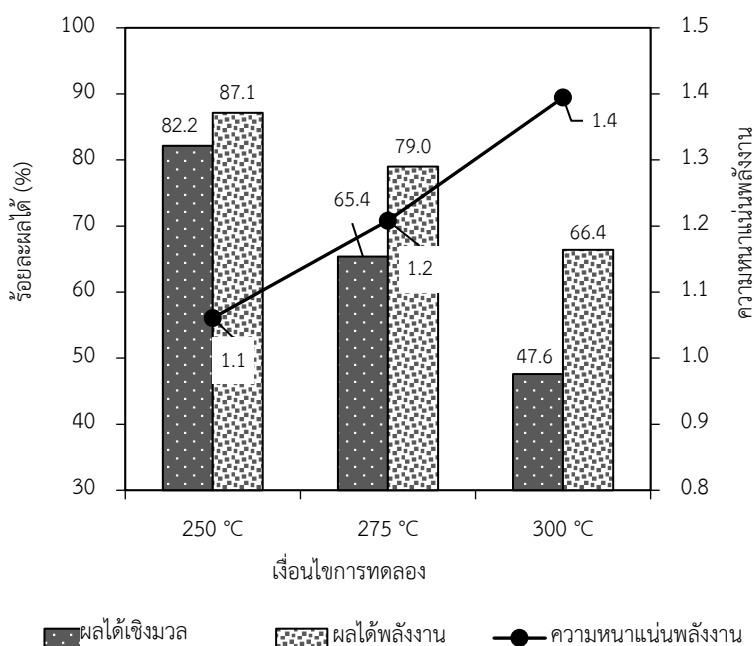
เงื่อนไขการทดลอง	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี				ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
	คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน		
เหง้ามันสำปะหลังดิบ	44.56±0.09 ^d	41.90±0.34 ^a	6.10±0.10 ^a	1.26±0.01 ^d	17.79±0.04 ^d	6.18±0.15 ^b
250 °C	47.54±0.41 ^c	39.20±0.53 ^b	5.39±0.14 ^b	1.34±0.02 ^c	18.87±0.19 ^c	6.53±0.05 ^b
275 °C	54.07±0.55 ^b	32.27±0.60 ^c	5.28±0.12 ^b	1.63±0.00 ^b	21.49±0.30 ^b	6.75±0.07 ^b
300 °C	62.51±0.04 ^a	22.00±0.29 ^d	4.71±0.09 ^c	2.03±0.01 ^a	24.81±0.07 ^a	8.76±0.22 ^a

^{a-d} หมายถึง อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวดิ่ง ($P \leq 0.05$)

ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์

ผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันสูงขึ้น ส่งผลให้ผลได้เชิงมวลของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 82.2 65.4 และ 47.6 ตามลำดับ จากผลการศึกษาของ Niu และคณะ [25] พบว่า ผลได้เชิงมวลที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่างร้อยละ

60 ถึง 80 ดังนั้นการทอรรีไฟด์เหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้ผลได้เชิงมวลต่ำกว่าในช่วงที่เหมาะสม ผลได้เชิงมวลของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเนื่องจากกระบวนการระเหยด้วยความร้อนของน้ำอิสระ (Free Water) ที่อยู่บนผิวหน้าและระหว่างโมเลกุลของชีวมวล การเกิดการดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของน้ำในโครงสร้างโมเลกุล และการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลได้มากขึ้นของเอมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีในชีวมวลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) จำนวนมาก และมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ [26]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของผลได้เชิงมวล ผลได้พลังงาน และความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์

การลดลงของผลได้เชิงมวลยังส่งผลให้ผลได้พลังงานลดลงเช่นกันเนื่องจากพลังงานบางส่วนอยู่ในไอระเหยซึ่งเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวล (เซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และ ลิกนิน) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซในระหว่างการทอรรีแฟกชันโดยผลได้พลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 87.1 79.0 และ 66.4 ตามลำดับ และแม้แนวโน้มของทั้งผลได้เชิงมวลและผลได้พลังงานมีค่า

ลดลงแต่เมื่อพิจารณาด้านความหนาแน่นพลังงานพบว่ามีความสูงขึ้นเป็น 1.1 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ แม้ว่าผลได้พลังงานจะมีค่าลดลงแต่เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนภายหลังการปรับปรุงซึ่งมีนัยสำคัญมากกว่าการลดลงของผลได้พลังงานจึงส่งผลให้ความหนาแน่นพลังงานของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่สูงขึ้น

ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของชีวมวล

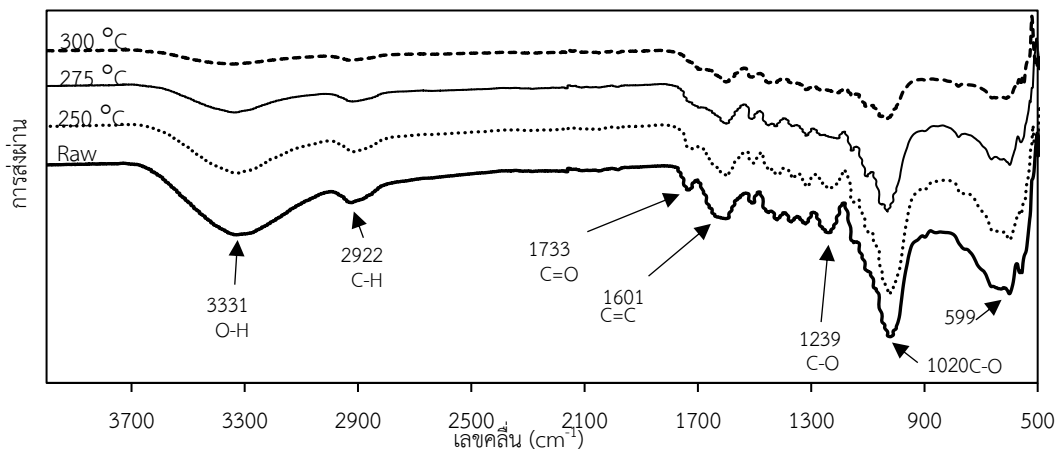
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ในเหง้ามันสำปะหลังและเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ด้วยเทคนิค FT-IR โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและให้สเปกตรัมที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะในโมเลกุลในเหง้ามันสำปะหลัง สารอินทรีย์ชนิดเดียวกันจะมีหมู่ฟังก์ชันเดียวกันจึงมีสมบัติเฉพาะตัวคล้ายกัน ลักษณะของสเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ จำแนกได้ตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบหลักของชีวมวล คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การเปลี่ยนแปลงของพีคการดูดกลืนเมื่อเหง้ามันสำปะหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชัน ดังรูปที่ 7 การปรากฏลักษณะแถบสเปกตรัมและความเข้มสูงเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 3,600-3,200 2,922 1,733 1,601 1,239 และ 1,020 ต่อเซนติเมตร และภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชันที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าพีคยังคงปรากฏที่ตำแหน่งเดิมแต่ความเข้มมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด การปรากฏลักษณะแถบสเปกตรัมและความเข้มสูงเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 3,600-3,200 ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล [28] ทั้งก่อนและภายหลังการปรับปรุงคุณภาพโดยพีคยังคงปรากฏที่ตำแหน่งเดิมแต่ความเข้มมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกชันมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส สามารถอธิบายได้จากการที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่หลักในโครงสร้างและเป็นส่วนที่มีขั้วในโมเลกุล ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศได้ เมื่อทอรรีไฟกชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิดการสลายตัว จึงทำให้สภาพขั้วของโมเลกุลอ่อนลง การสร้างพันธะกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศจึงเกิดได้น้อยลง ดังนั้นเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่าน

การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทอรรีไฟกชันจึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้สามารถชะลอการย่อยสลายทางชีวภาพส่งผลให้สามารถเก็บได้นานมากขึ้น การปรากฏพีคที่เลขคลื่น 2,922 ต่อเซนติเมตรแสดงการสั่นแบบยืดของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon; C-H) ประเภทแอลเคน (Alkane) ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส [29] โดยให้แถบที่มีความเข้มสูงในช่วงเลขคลื่น 3,000-2,800 ต่อเซนติเมตร จากรูปที่ 7 ยังคงปรากฏพีคในทุกอุณหภูมิที่ใช้ทอรรีไฟกต์แต่ความเข้มพีคมีค่าลดลง นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกต์มีค่าสูงขึ้นส่งผลต่อการลดลงของปริมาณเซลลูโลสในเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟกซ์ซึ่งเป็นสาเหตุการลดลงของผลได้เชิงมวล

การปรากฏพีค 1,733 ต่อเซนติเมตร ในช่วงเลขคลื่น 1,765-1,715 ต่อเซนติเมตร ตรงกับการสั่นของพันธะ C=O ในหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [30] พบว่าความเข้มของพีคมีค่าลดลงในทุกอุณหภูมิที่ใช้ทอรรีไฟกต์ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟกต์สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวของหมู่คาร์บอนิลในเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้นซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการลดลงของผลได้เชิงมวล การปรากฏพีค 1,601 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C ในอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีเสถียรภาพสูงภายในโครงสร้างของลิกนิน [31] ความเข้มพีคมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิทอรรีไฟกต์มีค่าสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส แม้โครงสร้างของลิกนินจะมีความแข็งแรงแต่เนื่องจากลิกนินมีช่วงการสลายตัวที่กว้างคือ 150-900 องศาเซลเซียส จึงพบการสลายตัวของลิกนินเพียงบางส่วนเนื่องจากในการศึกษานี้ทำการทอรรีไฟกต์เฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส

การปรากฏพีคที่ 1,239 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดที่ไม่สมมาตร (Asymmetric stretching) ของพันธะ C-O ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และการปรากฏพีค 1,020 ต่อ

เซนติเมตร ตรงกับการสั่นของพันธะ C-O ในโครงสร้าง พิกะมีค่าลดลงอย่างมากและเริ่มไม่ปรากฏพิกะที่อุณหภูมิ ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [32] ซึ่งความเข้มของ ในกระบวนการสูงกว่า 275 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 สเปกตรัมการส่งผ่านของเหง้ามันสำปะหลังดิบและเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250-300 °C

สรุปผล

การปรับปรุงสมบัติด้านเชื้อเพลิงของเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 250 275 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่อเนื่องนาน 30 นาที ส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงของเหง้ามันสำปะหลังทอรรีไฟด์หรือก็คือ ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าสูงกว่าเหง้ามันสำปะหลังดิบ และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ส่งผลให้สมบัติด้านเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน ความหนาแน่นพลังงานมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียง ถ่านหินลิกไนต์ อีกทั้งปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย สำหรับการผลิตชีวมวลทอรรีไฟด์ในเชิงพาณิชย์ควรตระหนักถึงปริมาณผลได้เชิงมวล เนื่องจากมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ

เอกสารอ้างอิง

1. Pattiya A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresour Technol.* 2011;102(2):1959-67.
2. Jongpluempiti J, Tangchaichit K. Comparison proximate analysis and heating value between cassava rhizome and perennial Wood. *Adv Mater Res.* 2012;415-417:1693-6.
3. Chitsanucha S, Khwanruthai T. The study on efficacy charcoal from corn cob and charcoal from cassava rhizome. In: *The 3th National Conference KPRU. Kamphaeng Phet, Thailand;* 608-13.
4. Günther B, Gebauer K, Barkowski R, Rosenthal M, Bues C-T. Calorific value of selected wood species and wood products. *Eur J Wood Prod.* 2012;70(5):755-7.
5. Shariff A, Noor N, Lau A, Ali M. A comparative study on biochar from slow pyrolysis of corn cob and cassava wastes. *Int j sci res innov.* 2016;10(12):767-71.
6. Rueangsana K, Kraisoda P, Heman A, Tasarod H, Wangkulangkool M, Trisupakitti S, et al. Bio-oil and char obtained from cassava

- rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. *Heliyon*, 2021;7(11):e08291.
7. Acharya B, Sule I, Dutta A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conv Bioresour*. 2012;2(4):349–69.
 8. Nakason K, Khemthong P, Kraithong W, Chukaew P, Panyapinyopol B, Kitkaew D, et al. Upgrading properties of biochar fuel derived from cassava rhizome via torrefaction: Effect of sweeping gas atmospheres and its economic feasibility. *Case Stud Therm Eng*. 2021;23:100823.
 9. Tumuluru JS, Sokhansanj S, Hess JR, Wright CT, Boardman RD. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Ind Biotechnol*. 2011;7(5):384-401.
 10. Negi S, Jaswal G, Dass K, Mazumder K, Elumalai S, Roy JK. Torrefaction: a sustainable method for transforming of agri-wastes to high energy density solids (biocoal). *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2020;19(2):463–88.
 11. Soponpongpiat N, Nanetoe S, Comsawang P. Thermal Degradation of Cassava Rhizome in Thermosyphon-Fixed Bed Torrefaction Reactor. *Processes*. 2020;8(3):267.
 12. Mamvura TA, Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 2020;6(3):e03531.
 13. Granados DA, Velásquez HI, Chejne F. Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. *Energy*. 2014;74: 181–9.
 14. Bai X, Wang G, Gong C, Yu Y, Liu W, Wang D. Co-pelletizing characteristics of torrefied wheat straw with peanut shell. *Bioresour Technol*. 2017;233:373–81.
 15. Matali S, Rahman NA, Idris SS, Yaacob N, Alias AB. Lignocellulosic biomass solid fuel properties enhancement via torrefaction. *Procedia Eng*. 2016;148:671–8.
 16. Friedl A, Padouvas E, Rotter H, Varmuza K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*. 2005;544(1):191–8.
 17. Watanabe T, Shino A, Akashi K, Kikuchi J. Chemical profiling of jatropha tissues under different torrefaction conditions: application to biomass waste recovery. *PLoS One*. 2014; 9(9):e106893.
 18. Kosolkittiamporn S. Assumption test of one-way analysis of variance in social science research. *J YRU*. 2020;15(1):118-27.
 19. Viroj J. One-way ANOVA and multiple comparison in public health research: a case study of hemorrhagic fever protection. *Scimsu*. 2015;34(3):304-11.
 20. Dyjakon A, Noszczyk T, Smedzik M. The influence of torrefaction temperature on hydrophobic properties of waste biomass from food processing. *Energies*. 2019;12 (24):4609.

21. Mamvura TA, Pahla G, Muzenda E. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *S Afr J Chem Eng.* 2018;25:1–12.
22. Chen D, Gao A, Cen K, Zhang J, Cao X, Ma Z. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Convers Manag.* 2018;169:228–37.
23. Nakason K, Pathomrotsakun J, Kraithong W, Khemthong P, Panyapinyopol B. Torrefaction of agricultural wastes: influence of lignocellulosic types and treatment temperature on fuel properties of biochar. *Int Energy J.* 2019;19(4):253–66.
24. Lieskovský M, Jankovský M, Trenčiansky M, Merganic J. Ash content vs. the economics of using wood chips for energy: model based on data from central europe. *Bioresources.* 2017;12(1):1579–92.
25. Niu Y, Lv Y, Lei Y, Liu S, Liang Y, Wang D, et al. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019;115:109395.
26. Ramos-Carmona S, Pérez JF, Pelaez-Samaniego MR, Barrera R, Garcia-Perez M. Effect of torrefaction temperature on properties of Patula pine. *Maderas Ciencia y tecnología.* 2017;19(1):39–50.
27. Pala M, Kantarli IC, Buyukisik HB, Yanik J. Hydrothermal carbonization and torrefaction of grape pomace: a comparative evaluation. *Bioresour Technol.* 2014;161:255–62.
28. Hadjiivanov K. Identification and characterization of surface hydroxyl groups by infrared spectroscopy. *Adv Catal.* 2014;57:99–318.
29. Yin Y, Yin J, Zhang W, Tian H, Hu Z, Ruan M, et al. Effect of char structure evolution during pyrolysis on combustion characteristics and kinetics of waste biomass. *J Energy Resour Technol.* 2018;140(7):072203.
30. Granados DA, Ruiz RA, Vega LY, Chejne F. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy.* 2017;139:818–27.
31. Horikawa Y, Hirano S, Mihashi A, Kobayashi Y, Zhai S, Sugiyama J. Prediction of lignin contents from infrared spectroscopy: chemical digestion and lignin/biomass ratios of cryptomeria japonica. *Appl Biochem Biotechnol.* 2019;188(4):1066–76.
32. So CL, Eberhardt TL. FTIR-based models for assessment of mass yield and biofuel properties of torrefied wood. *Wood Sci Technol.* 2018;52:209-27.



การขดของเชือกบนพื้นราบหมุน

Rope Coiling on a Rotating Plane

สิรภพ เงินงาม* และ มาริสยา เย็นตุรัส

Sirapop Ngoenngam* and Marisa Yenturat

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110

Major field of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Khlong Luang, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: Sirapop_kong801@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: March 31, 2022

Revised: May 20, 2022

Accepted: June 6, 2022

Available online: June 12, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.10

Keywords: buckling instability, hypotrochoid, epitrochoid, circle

Feeding the rope steadily with uniform velocity about 67.15 cm/s from the height 105 cm toward the rotating plane creates a variety of coiling shapes, resulted from the buckling instability. Our present work aims to classify all possible coiling patterns on a rotating flat surface, studying the measurement of coiling sizes, the frequency of coiling, which is a function of height, speed of rope feeding and frequency of rotation of the plane. In the experiment, the coiling of a rope on a flat surface in a circular motion and rotating on a flat surface would destroy the symmetry of the circle. The shape occurs sequentially starting from the hypotrochoid, then the epitrochoid and finally to the circle. The hypotrochoid to epitrochoid transition is associated with a reversal of the direction of the angular momentum. The criteria for the epitrochoid to circle transition are an equality between the primary and secondary radii of the epitrochoid, and the number of secondary loops reducing facing inward will continue to decrease until there are no more sub rings facing inward the rope is coiled in a circular pattern. Including factors that determine the form of a new coiling such as, the height of the rope release point, rope feeding speed and the rotation frequency

of the plane. The factors related to the properties of the rope are Young's modulus. This principle of physics can also explain the spiral patterns of viscous liquids on a rotating flat surface. where the elastic force in the case of rope is the viscous force in the case of liquid. Such an understanding is beneficial to the design of 3D printers.

บทคัดย่อ

การบิดเบี้ยวอย่างสม่ำเสมอด้วยความเร็วคงที่ 67.15 cm/s จากระดับความสูง 105 เซนติเมตรลงสู่พื้นราบหมุน ก่อให้เกิดการขดของเชือกในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งแสดงออกถึงการสูญเสียเสถียรภาพอันเป็นผลจากการโก่งเดาะ (Buckling) โดยงานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการขดเชือกที่เป็นไปได้ทั้งหมดบนพื้นราบหมุน และศึกษาการวัดขนาดของการขดและความถี่ของการขดเป็นฟังก์ชันกับความถี่การหมุนของระนาบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการขดของเชือกบนพื้นราบนิ่งจะมีรูปแบบการขดเป็นวงกลม ส่วนการขดบนพื้นราบหมุนที่จะทำให้ลายสมมาตรของวงกลม ก่อให้เกิดรูปแบบการขดใหม่ ได้แก่ ไฮโปโทรคอยด์ (Hypotrochoid), เอพิโทรคอยด์ (Epitrochoid) และวงกลม (Circle) การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของ ไฮโปโทรคอยด์เป็นเอพิโทรคอยด์มีความเกี่ยวข้องกับการกลับตัวของทิศทางของโมเมนตัมเชิงมุม เกณฑ์สำหรับการเปลี่ยนผ่านจากเอพิโทรคอยด์เป็นวงกลมคือความเท่าเทียมกันระหว่างรัศมีวงหลักและรัศมีวงรองของรูปแบบเอพิโทรคอยด์ และจำนวนวงย่อยหันเข้าด้านในจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนไม่มีวงย่อยหันเข้าด้านในอีกต่อไป เชือกจะขดเป็นรูปแบบวงกลมปัจจัยที่กำหนดรูปแบบของการขดใหม่ ได้แก่ ความสูงของจุดปล่อยเชือก, ความเร็วในการบิดเชือก และความถี่การหมุนของระนาบ ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของเชือก ได้แก่ ค่ามอดูลัสยัง (Young's Modulus) หลักการฟิสิกส์ดังกล่าวนี้ยังสามารถอธิบายรูปแบบการขดของของเหลวหนืดบนพื้นราบหมุน โดยแทนแรงยึดหยุ่นในกรณีของเชือกเป็นแรงหนืดในกรณีของ

ของเหลว ความเข้าใจดังกล่าวเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องพิมพ์สามมิติ

คำสำคัญ: การสูญเสียเสถียรภาพแบบโก่งเดาะ ไฮโปโทรคอยด์ เอพิโทรคอยด์ วงกลม

บทนำ

การโก่งของเกลียวและแผ่นของเหลวเกลียวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหลาย ๆ สถานการณ์ ตัวอย่างในชีวิตประจำวันมากมาย รวมถึงการขดเกลียวของน้ำผึ้งที่ถูกเทลงบนชิ้นส่วนของขนมปังหรือเจลอาบน้ำที่ขดเกลียวตามที่เทลงบนมือ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมมักเป็นที่พึงปรารถนาในการยับยั้งการโก่งงอของเหลว เช่นระหว่างกระบวนการเติมซึ่งแผ่นที่โค้งงอของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดอากาศหรือของเหลวรอบข้างซึ่งอาจส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง ในทางกลับกันการโก่งงอของเหลวอาจถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่นเพื่อช่วยในการผลิตขนม เช่น ไอศกรีมเวียนเน็ตต้า หรือในระหว่างการสร้างโฟมและอิมัลชันภายในช่องทางไหลจุลภาค (Microfluidics) และปรากฏการณ์โก่งงอเกิดขึ้นในกระบวนการทางธรณีวิทยา [1] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การขดที่พบในชีวิตประจำวัน (ก) การขดเกลียวของน้ำผึ้ง (ข) ผลิตภัณฑ์ขนมไอศกรีมเวียนเน็ตต้า (ค) ปรากฏการณ์โก่งงอเกิดขึ้นในกระบวนการทางธรณีวิทยา

การขดเชือกสามารถเข้าใจได้บนพื้นฐานของแท่งยืดหยุ่น เกิดขึ้นหลายบริบท เช่น แบบจำลองดีเอ็นเอ (Deoxy-Ribonucleic Acid, DNA) โพลีเมอร์ และขน [2-4] คุณสมบัติที่เหมือนกันของวัสดุที่แตกต่างกันเหล่านี้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อแรงและทอร์ก วัสดุเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องโดยไม่ฉีกขาดเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ รูปร่างที่เกิดขึ้นเป็นสถานะที่ให้พลังงานของระบบต่ำสุด โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีลักษณะสำคัญ 3 รูปแบบ คือ การบีบอัด การโค้งงอ และการบิด ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบนี้สามารถเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน สำหรับแท่งยืดหยุ่นที่มีเส้นศูนย์กลางน้อยกว่าความยาว การบิดรอบแกนต้องใช้พลังงานมาก หากไม่มีทอร์กภายนอก การอัดและการดัดรอบแกนจะใช้พลังงานน้อยกว่าจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า เมื่อการอัดตามแนวแกนของแท่งยืดหยุ่นมีค่าเกินค่าขีดเริ่มแท่งยืดหยุ่นจะเริ่ม โค้งงอ การโค้งงอนี้จะขึ้นอยู่กับเรขาคณิตและสมบัติยืดหยุ่นของแท่งการโค้งงอที่มากเกินไปจะส่งผลให้แท่งยืดหยุ่นเกิดการสูญเสียสภาพแบบโก่งเดาะ (Buckling Instability) สำหรับระบบมหภาคการสูญเสียสภาพแบบโก่งเดาะเป็นผลทางกลศาสตร์ นอกจากนี้การสูญเสียสภาพแบบโก่งเดาะยังสามารถเกิดขึ้นจากความไม่เข้าใจกันระหว่างเรขาคณิตของรอยพับกับการยืดของแผ่นบาง การปฏิบัติตามแนวกึ่งกลางของวงแหวนจะทำให้แผ่นซึ่งเคยวางตัวในระนาบโค้งงอออกจากระนาบนั้นวงแหวนดังกล่าวจะโค้งงอขึ้นเป็นรูปอานม้าแม้ว่าจะไม่มีแรงภายนอกมากระทำก็ตาม [5]

ก่อนหน้านี้นี้มีการศึกษาการก่อตัวของเงื่อน (Knot) เชือกเปรียบได้กับโพลีเมอร์ขด การเกิดเงื่อนในสาย โพลีเมอร์มีผลต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheological Properties) [6] มีการศึกษาเงื่อนโดยบรรจุเชือกยาวในกล่องลูกบาศก์ ทำการหมุนกล่องลูกบาศก์เชือกเกิดการพันกันเกิดเงื่อนหลายประเภท ซึ่งมีการจำแนกประเภทโดยพหุนามโจนส์ (Jones Polynomial) [7] หากมีการใส่เชือกในจานแบนราบ

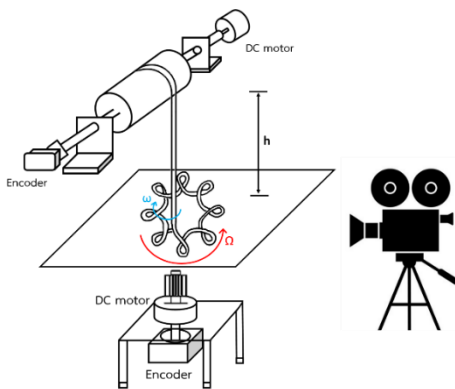
แทนที่กล่องลูกบาศก์ ระบบจะเป็น 2 มิติแทนที่เป็น 3 มิติ การบิดเบี้ยวของเชือกจึงจำกัดอยู่ในระนาบเดียวเท่านั้น เมื่อจานแบนเกิดการหมุนรูปแบบของเชือกจะจำแนกได้จากรัศมีไจเรชัน (Radius of Gyration) การทดลองทั้งดงามด้วยเครื่องมือที่เรียบง่ายเกิดการสร้างความบันเทิงใจให้เราใช้เชือกเป็นแบบจำลองของแท่งกลมายาว เพื่อศึกษาการสูญเสียเสถียรภาพแบบโก่งเดาะ

จากการทดลองได้มีการศึกษารูปแบบการขดที่เป็นไปได้ทั้งหมดบนพื้นราบหมุน สร้างแผนภาพเฟสเพื่อแสดงว่ารูปแบบการขดจะเป็นเช่นไรเมื่อให้ค่าความสูง, ความเร็วในการป้อนเชือก และความถี่การหมุนของระนาบ ตลอดจนศึกษาการวัดขนาดของการขดและความถี่ของการขดเป็นฟังก์ชันกับความถี่การหมุนของระนาบ

วิธีดำเนินการวิจัย

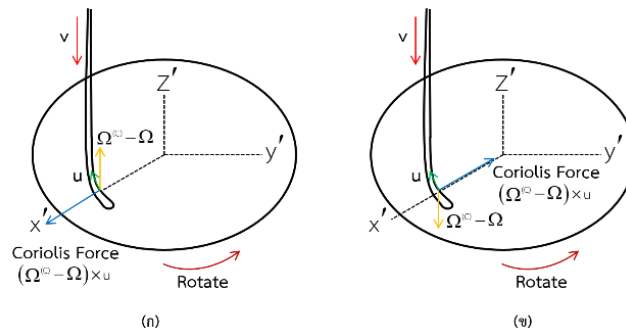
เชือกถูกปล่อยด้วยความเร็ว 67.15 เซนติเมตร/วินาที จากระดับความสูง 105 เซนติเมตร ไปยังระนาบพื้นหมุนดังแสดงในรูปที่ 2 รัศมีหน้าตัด ($2a_0$) = 0.2 เซนติเมตร ให้พื้นที่หน้าตัดขวางเป็นวงกลม $A = 3.14 \times 10^{-2}$ เซนติเมตร² และโมเมนต์ความเฉื่อยของภาคตัดขวาง $I = A^2/2\pi = 1.57 \times 10^{-4}$ เซนติเมตร⁴ ความหนาแน่น = 0.51 กรัม/เซนติเมตร³ และมอดูลัสของยัง $E = 2.43$ เมกะปาสคาล เพื่อปล่อยเชือกให้ราบเริ่มมีมอเตอร์กระแสตรงหมุนกระบอกลูกกลิ้งมีรัศมี 6.4 เซนติเมตร รอบเชือกที่พันรอบ วัดความถี่การหมุนของกระบอกสูบโดยออสซิลโลสโคปที่สร้างฟังก์ชัน 500 ฟังก์ชัน/รอบ ด้านล่างของระนาบพื้นราบหมุนถูกหมุนด้วยมอเตอร์กระแสตรงตัวที่สอง ความถี่ในการหมุนของระนาบ f_0 วัดด้วยออสซิลโลสโคปที่สอง ความถี่ตามธรรมชาติของเชือกแขวนอยู่ f_1 ประมาณ $(1/2\pi)\sqrt{g/h} = 0.45$ Hz ช่วงของ f_0 รวมถึงความถี่ธรรมชาติระนาบพื้นราบหมุนถูกหมุนวนเข้ามาพิจารณาด้วยความเร็วเชิงมุม $\Omega = 2\pi f_0$ ในขณะที่เชือกขด

ทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = 2\pi f$ โดยที่ f หมายถึงความถี่การหมุนของเชือก



รูปที่ 2 การจัดอุปกรณ์ในการทดลอง พันเชือกบนลูกกลิ้งซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่กระแสดงตรง วัดความถี่การหมุนของลูกกลิ้งด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) โดยเชือกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จากความสูง h

การขดของเชือกบนพื้นราบนี้มี 3 ลักษณะ เช่นเดียวกับของเหลวหนืด แตกต่างกันเพียง การขดหนืดกลายเป็นการขดยืดหยุ่น ในกรณีของแข็ง แรงยืดหยุ่นแสดงบทบาทแทนแรงหนืด รูปแบบการขดของเชือกบนพื้นราบเลื่อนที่เหมือนกับของเหลวหนืด ดังนั้นแรงที่



รูปที่ 3 ทิศทางของแรงโคริโอลิสเมื่อ (ก) ความเร็วเชิงมุมน้อยกว่าความเร็วเชิงมุมวิกฤติ (ข) ความเร็วเชิงมุมมากกว่าความเร็วเชิงมุมวิกฤติ

การเกิดรูปแบบการขดของเชือกบนพื้นราบนี้ เป็นวงกลม การหมุนพื้นราบนี้ทำลายสมมาตรของวงกลม ก่อให้เกิดรูปแบบการขดใหม่ ได้แก่ ไฮโปโทรคอยด์ (Hypotrochoid), เอพิโทรคอยด์ (Epitrochoid) และวงกลม (Circle) โดยหากความถี่ของพื้นราบหมุนมี

กระทำต่อเชือก 3 แรงหลัก ๆ ด้วยกัน ได้แก่ แรงยืดหยุ่น (Elastic force) แรงโน้มถ่วง (Gravity) และแรงเฉื่อย (Inertia) กำหนดให้ F_E คือแรงยืดหยุ่นต่อหนึ่งหน่วยความยาว F_G คือแรงโน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยความยาว และ F_I คือแรงเฉื่อยต่อหนึ่งหน่วยความยาว [8] ดังสมการที่ 1-3

$$F_E \approx \frac{E(2a_0)^4}{R^3} \quad (1)$$

$$F_G \approx \rho g (2a_0)^2 \quad (2)$$

$$F_I \approx \frac{\rho (2a_0)^2 v^2}{R} \quad (3)$$

หมายเหตุ: ρ (ความหนาแน่น), g (ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก)

ระดับความยาว (length Scale): R หาได้จากแรงยืดหยุ่นต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับแรงโน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยความยาว มีค่าเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร และระดับเวลา (Time Scale): t หาได้จากแรงโน้มถ่วงต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับแรงเฉื่อยต่อหนึ่งหน่วยความยาว มีค่าเท่ากับ 0.11 วินาที [9, 10]

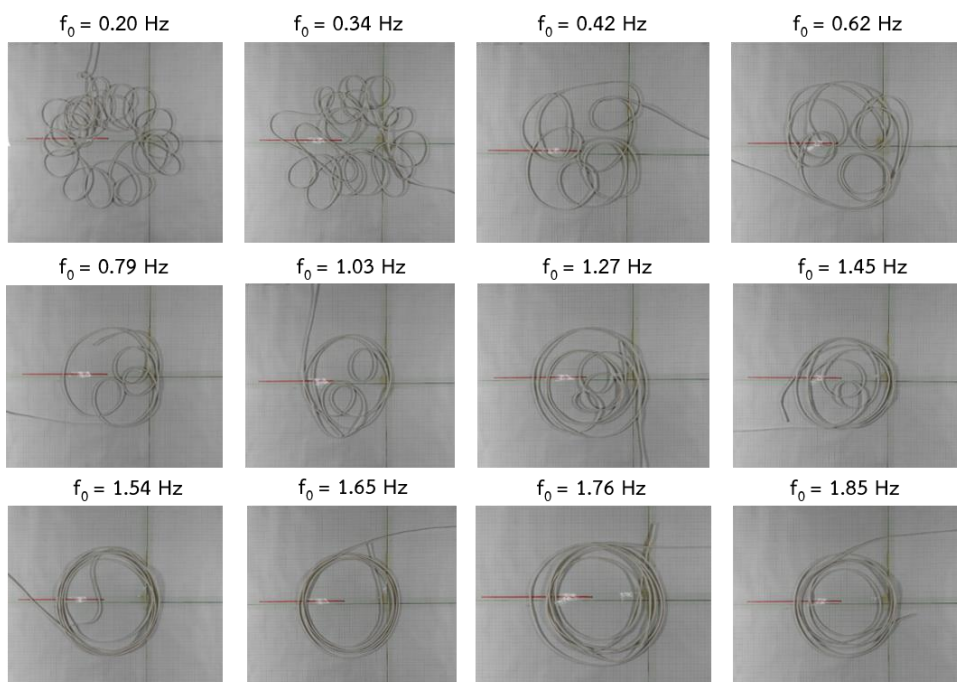
ค่า $f_0 < f_0^{(c)}$ และมีความเร็วเชิงมุมเป็น $\Omega < \Omega^{(c)}$ เชือกขดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดย u คือความเร็วในการขด แรงโคริโอลิส (Coriolis Force) ตามกฎของมือขวามีทิศพุ่งออกจากศูนย์กลาง ดังนั้นเชือกจึงขดออกด้านนอก เกิดเป็นไฮโปโทรคอยด์ (Hypotrochoid) ถ้า

หากความถี่ของพื้นราบหมุนมีค่า $f_0 > f_0^{(c)}$ มีความเร็วเชิงมุมเป็น $\Omega > \Omega^{(c)}$ เชือกขดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดย Ω คือความเร็วในการขด แรงโคริโอลิสตามกฎของมือขวามีทิศพุ่งเข้าหาศูนย์กลาง ดังนั้นเชือกจึงขดออกด้านนอกเกิดเป็นเอพิโทรคอยด์ ซึ่ง f_0 คือความถี่ของพื้นราบหมุน, $f_0^{(c)}$ คือความถี่วิกฤตของพื้นราบหมุน, Ω คือความเร็วเชิงมุมของพื้นราบหมุน และ $\Omega^{(c)}$ คือความเร็วเชิงมุมวิกฤตของพื้นราบหมุน แสดงดังรูปที่ 3

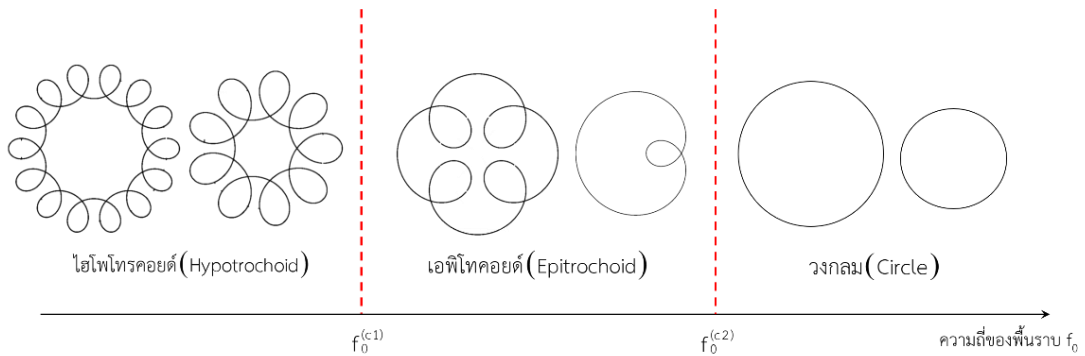
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ป้อนเชือกด้วยความเร็วคงที่ $v = 67.15$ cm/s จากระดับความสูง 105 เซนติเมตร โดยการป้อนความต่างศักย์ 13.2 V มีกระแสไหลผ่าน 1.09 A พื้นราบหมุนทวนเข็มนาฬิกาและเชือกขดลงบนพื้นราบหมุนตามเข็มนาฬิกา และที่มีความเร็วในการป้อนเชือกนี้ หากป้อนเชือกบนพื้นราบนิ่ง เชือกจะขดเป็นวงกลมด้วยความเร็ว $v = 65$ cm/s และความถี่ของการขดคือ 3.077 Hz

จากการทดลองจะเห็นได้ว่ารูปแบบของการขดของเชือกนั้นมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของไฮโปโทรคอยด์ และเอพิโทรคอยด์เป็นอย่างมาก ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่าการป้อนเชือกด้วยความเร็วที่เร็วกว่าอัตราที่แผ่นระนาบหมุนสามารถถ่ายโอนได้ความยาวที่มากเกินไปจะถูกนำไปใช้ในการสร้างวงย่อยภายนอกที่เส้นรอบวงของวงกลม โดยเรียกว่าเป็นรูปแบบ ไฮโปโทรคอยด์ จะประกอบด้วยวงย่อยภายนอก 15 วงย่อยและ 10 รอบต่อการหมุนที่ $f_0 = 0.20$ Hz และ $f_0 = 0.34$ Hz ตามลำดับ การเพิ่ม f_0 เป็น 0.42 Hz จะทำให้ไฮโปโทรคอยด์นั้นไม่คงที่และ เอพิโทรคอยด์จะเกิดการวนซ้ำภายใน 4 วงย่อยและ 1 รอบต่อการหมุน เมื่อ f_0 เพิ่มขึ้นเป็น $f_0 = 1.54$ Hz แผ่นระนาบจะหมุนอย่างรวดเร็วพอที่จะถ่ายโอนความยาวที่เพิ่มขึ้นเพื่อสร้างวงย่อยภายใน โดยเอพิโทรคอยด์จะถูกยึดออกไปตามทิศทางตามแนวเส้นรอบวง เพื่อกำจัดหรือลดวงย่อยภายในทั้งหมด ดังนั้นจึงถูกเปลี่ยนรูปเป็นวงกลมรัศมีของวงกลมนั้นเล็กลงเมื่อ f_0 เพิ่มขึ้นเป็น 1.85 Hz ดังรูปที่ 4

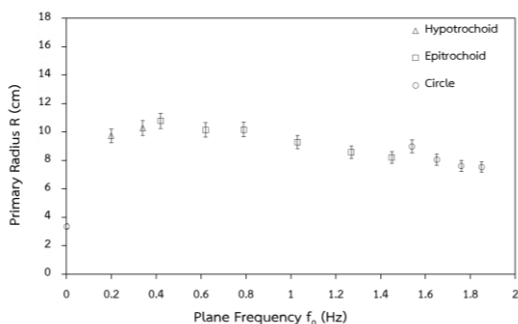


รูปที่ 4 แสดงการขดของเชือกบนพื้นราบหมุนที่ความเร็วในการป้อนเชือกคงที่ 67.15 cm/s จากระดับความสูง 105 cm ลงบนพื้นราบที่หมุนด้วยความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 5 รูปแบบการขดเชือกแบบไฮโปโทรคอยด์ (Hypotrochoid), เอพิโทรคอยด์ (Epitrochoid) และวงกลม (Circle) ตามลำดับ

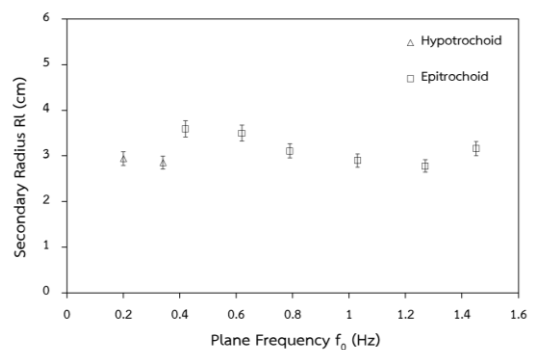
ดังนั้นเมื่อความเร็วในการป้อนเชือก v เร็วพอ เชือกจะขดเป็นรูปแบบ ไฮโปโทรคอยด์บนพื้นราบหมุน เมื่อเพิ่มความถี่การหมุน f_0 ของพื้นราบหมุน จำนวนวงย่อยหันออกด้านนอกของไฮโปโทรคอยด์จะลดลงเมื่อเพิ่มความถี่การหมุน f_0 ไปอีกจนเกินค่าวิกฤติ $f_0^{(c1)}$ เชือกจะขดเป็นรูปแบบ เอพิโทรคอยด์เมื่อเพิ่มความถี่การหมุน f_0 ไปอีกจนเกินค่าวิกฤติ $f_0^{(c2)}$ จำนวนวงย่อยหันเข้าด้านในของเอพิโทรคอยด์จะลดลงไปเรื่อย ๆ จนไม่มีวงย่อยหันเข้าด้านในอีกต่อไป เชือกจะขดเป็นรูปแบบวงกลม ดังรูปที่ 5 กล่าวโดยสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มความถี่การหมุน f_0 ของพื้นราบหมุน ลำดับของรูปแบบที่เกิดขึ้นคือ ไฮโปโทร-คอยด์, เอพิโทรคอยด์ และวงกลม



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงหลัก (R) กับความถี่ของพื้นราบ (f_0)

จากการทดลองสามารถเสนอได้โดยกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงหลัก R กับความถี่ของพื้นราบ f_0 ตามรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเราเพิ่ม

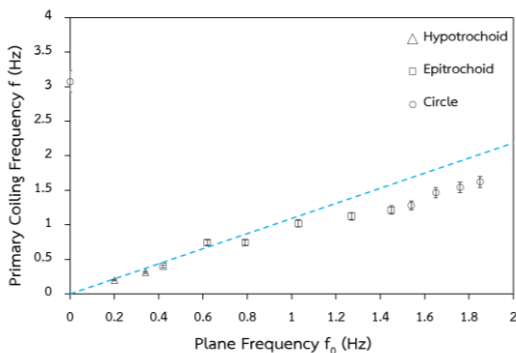
ความถี่ของพื้นราบ f_0 ไปเรื่อย ๆ รูปแบบการขดเชือกจะมีการเปลี่ยนรูปแบบเป็น ไฮโปโทรคอยด์, เอพิโทรคอยด์ และวงกลม ตามลำดับ ดังนั้นจึงส่งผลให้รัศมีในการขดของเชือกจะมีค่าลดลง เนื่องจากแรงเข้าสู่ศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นเมื่อพื้นราบหมุนด้วยความถี่มากขึ้น ในการพิจารณาในครั้งนี้นำรัศมีการขดของวงหลัก



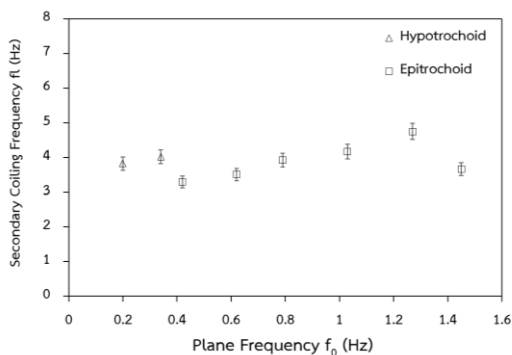
รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงรอง (R_1) กับความถี่ของพื้นราบ (f_0)

จากรูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงรอง R_1 กับความถี่ของพื้นราบ f_0 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของพื้นราบ f_0 ไปเรื่อย ๆ รูปแบบการขดเชือกจะมีการเปลี่ยนเป็นรูปแบบ ไฮโปโทรคอยด์เป็นเอพิโทรคอยด์ จนเชือกขดเป็นรูปแบบวงกลม ดังนั้นจึงส่งผลให้รัศมีของวงรองของ เอพิโทรคอยด์ใหญ่กว่าของไฮโปโทรคอยด์เพราะจำนวนวงรองของ ไฮโปโทรคอยด์มีมากกว่า ขณะที่รัศมีของวงหลักของ ไฮโปโทรคอยด์มีค่าใกล้เคียงกับของเอพิโทรคอยด์ความยาวเชือกของวง

รองของไฮโปโทรคอยด์ถูกใช้เป็นการยาวเชือกของวงรองของเอพิโทรคอยด์ แต่จำนวนวงรองของเอพิโทรคอยด์มีไม่มากนัก จึงทำให้แต่ละวงรองของเอพิโทรคอยด์มี ขนาดใหญ่ นอกจากนี้หากพิจารณารัศมีวงรองของเอพิโทรคอยด์พบว่าแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่อความถี่พื้นราบเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เพราะพื้นราบหมุนเร็วได้ถ่ายทอดความยาวเชือกในส่วนของวงรองไปที่อื่นวงรองจึงมีขนาดเล็กลง



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่หลัก (f) กับความถี่ของพื้นราบ (f_0) โดยเส้นประคือกราฟเส้นตรงเมื่อ $f = f_0$



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่วงรอง (f_l) กับความถี่ของพื้นราบ (f_0)

จากรูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการขดเชือกวงหลัก f กับความถี่ของพื้นราบ f_0 จะเห็นได้ว่าในบริเวณที่มีความถี่ของพื้นราบ f_0 ต่ำ จะเกิดรูปแบบของการขดเชือกเป็น ไฮโปโทรคอยด์ และเมื่อเพิ่มความถี่ของพื้นราบ f_0 ไปเรื่อย ๆ รูปแบบการขด

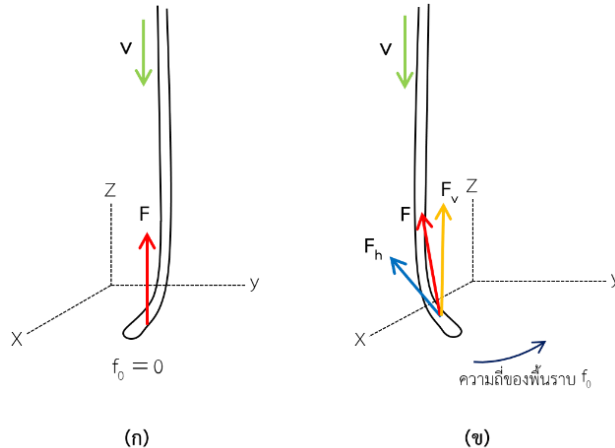
เชือกจะมีการเปลี่ยนเป็นรูปแบบเอพิโทรคอยด์ และวงกลม ตามลำดับ หากเราลากเส้นตรง $f = f_0$ ในรูปที่ 8 แทบจะผ่านทุกจุดข้อมูล ที่ความเร็วในการป้อนเชือก 67.15 cm/s จัดว่าเป็นความเร็วที่มาก ทำให้เชือกแทบจะเคลื่อนที่ติดไปกับพื้นราบหมุน กล่าวคือความถี่ของวงหลัก f มีค่าประมาณความถี่ของพื้นราบ f_0 ฉะนั้นเมื่อพื้นราบหมุนด้วยความถี่ f_0 มากขึ้น เชือกย่อมขดด้วยความถี่ f ที่มากขึ้นเช่นกัน

จากรูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการขดเชือกวงรอง f_l กับความถี่ของพื้นราบ f_0 จะเห็นได้ว่าในบริเวณที่มีความถี่ของพื้นราบ f_0 ต่ำ จะเกิดรูปแบบของการขดเชือกเป็น ไฮโปโทรคอยด์ (Hypotrochoid) และหากสังเกตดูกราฟความถี่วงรอง f_l ในรูปที่ 9 เป็นการพลิกจากบนลงล่างและล่างขึ้นบนของกราฟรัศมีวงรอง R_l ในรูปที่ 7 โดยจากความสัมพันธ์ $v = 2\pi R_l f_l$ เนื่องจากความเร็วในการป้อนเชือก v เท่ากัน มีผลให้แนวโน้มของความถี่วงรอง f_l จึงตรงข้ามกับของรัศมีวงรอง R_l ตามความสัมพันธ์ $f_l = v / 2\pi R_l$ โดยความเร็วในการป้อนเชือกคงที่ เมื่อความถี่วงรองมีค่าลดลง จะส่งผลให้รัศมีวงรองเพิ่มขึ้น ตลอดจนถ้าความถี่วงรองมีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้รัศมีวงรองลดลงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาในกรณีพื้นราบนิ่ง เมื่อเชือกเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็วคงที่ v กระทั่งพื้นแล้วเชือกจะหยุดการเคลื่อนที่ทันที โดยพื้นจะออกแรงกระทำต่อเชือกในแนวตั้งพุ่งขึ้น F เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของเชือก ขณะที่ในพื้นราบหมุน เมื่อเชือกเคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็วคงที่ v เช่นเดียวกัน พอกระทบกับพื้นแล้วเชือกจะมีการปรับความเร็วให้เท่ากับความเร็วตามแนวเส้นรอบวงของพื้นราบหมุน โดยพื้นราบหมุนจะมีการออกแรงกระทำต่อเชือกเพื่อปรับความเร็วดังกล่าว ความเร็วของเชือกก่อนกระทบพื้นราบหมุนมีทิศพุ่งลงด้านล่าง หลังกระทบกับพื้นราบหมุนแล้ว ความเร็วของเชือกจะอยู่ในแนวระนาบเดียวกับพื้นราบและมีทิศ

ตามแนวเส้น รอบวง สามารถหาแรงได้จากอัตรา การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม $F = \Delta P / \Delta t$ จะเห็นได้ว่า พื้นราบหมุนออกแรงกระทำต่อเชือกในทิศทางที่แรงพุ่งเฉียงขึ้นจากพื้นราบ F จึงมีองค์ประกอบตามแนวตั้งและตามแนวราบ โดยสามารถอธิบายขยายความได้ว่า

องค์ประกอบตามแนวตั้งจะเหมือนกับพื้นราบนิ่งคือทิศพุ่งขึ้น F_v ในรูปที่ 10 ส่วนองค์ประกอบตามแนวราบจะมีการดึงเชือกให้ขยารัศมีวงหลักให้มีขนาดใหญ่ขึ้น F_h จึงเป็นผลทำให้รัศมีวงหลักของพื้นราบนิ่งมาค่าน้อยกว่ารัศมีบนพื้นราบหมุน ในรูปที่ 6



รูปที่ 10 องค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อเชือกเมื่อ (ก) พื้นราบนิ่ง (ข) พื้นราบหมุน

จากที่กล่าวข้างต้นเมื่อใช้การอนุรักษ์มวลของเชือก กล่าวคือ $v = 2\pi fR$ เมื่อรัศมี R บนพื้นราบหมุนมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีบนพื้นราบนิ่ง ความเร็วในการป้อนเชือก v บนพื้นราบนิ่งและพื้นราบหมุนมีค่าเท่ากัน ย่อมหมายความว่า ความถี่หลัก f บนพื้นราบหมุนมีค่าน้อยกว่าความถี่หลักบนพื้นราบนิ่ง ในรูป 8

สรุปผล

การขดของเชือก คือ การรวมตัวกันของความไม่แน่นอนของการโค้งงอ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีแรงอัดตามแนวแกนเกินค่าวิกฤติ $F_c = CE/L^2$ โดย C คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับประเภทของเงื่อนไขข้อต่อทั้งรัศมีการขด R ความถี่การขด f และพื้นราบหมุน f_0 ที่มีแรงที่กระทำต่อเชือกสามแรงหลักด้วยกัน คือแรงยืดหยุ่น (Elastic Force) แรงโน้มถ่วง (Gravity) และแรงเฉื่อย (Inertia) จากการทดลองรูปแบบของการขดของเชือกนั้นมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของไฮโพโทรคอยด์ และเอพิโทรคอยด์เป็นอย่างมาก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการป้อนเชือก

ด้วยความเร็วที่เร็วกว่าอัตราที่แผ่นระนาบหมุนสามารถถ่ายโอนได้ความยาวที่มากเกินไปจะถูกนำไปใช้ในการสร้างวงย่อยภายนอกที่เส้นรอบวงของวงกลม โดยเรียกว่าเป็นรูปแบบ ไฮโพโทรคอยด์เมื่อ f_0 เพิ่มขึ้นแผ่นระนาบจะหมุนอย่างรวดเร็วพอที่จะถ่ายโอนความยาวที่เพิ่มขึ้นเพื่อสร้างวงย่อยภายในโดยเอพิโทรคอยด์ จะถูกยึดออกไปตามทิศทางตามแนวเส้นรอบวง เพื่อการจัดหรือลดวงย่อยภายในทั้งหมด ดังนั้นจึงถูกเปลี่ยนรูปเป็นวงกลมจากลักษณะการเกิดรูปแบบของการขดเชือกเมื่อแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงหลัก R กับความถี่ของพื้นราบ f_0 มีผลทำให้รัศมีในการขดของเชือกจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงเข้าสู่ศูนย์กลางมีค่ามากขึ้นเมื่อพื้นราบหมุนด้วยความถี่มากขึ้น และเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการขดเชือกวงหลัก f กับความถี่ของพื้นราบ f_0 จะเห็นได้ว่าในบริเวณที่มีความถี่ของพื้นราบ f_0 ต่ำ มีผลทำให้ความถี่ในการขดเชือก f เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเราป้อนความเร็วในการเชือก 67.15 cm/s จัดว่าเป็นความเร็วที่มาก ทำให้

เชือกแทบจะเคลื่อนที่ติดไปกับพื้นราบหมุน กล่าวคือ ความถี่ของวงหลัก f มีค่าประมาณความถี่ของพื้นราบ f_0 ฉะนั้นเมื่อพื้นราบหมุนด้วยความถี่ f_0 มากขึ้น เชือกย่อมขดด้วยความถี่ f ที่มากขึ้นเช่นกัน หลักการทางฟิสิกส์ซึ่งกำหนดรูปแบบการขดของเชือกบนพื้นราบหมุน เป็นไปได้ว่าหลักการฟิสิกส์ดังกล่าวยังสามารถอธิบายรูปแบบการขดของของเหลวหนืดบนพื้นราบหมุน โดยแทนแรงยึดหยุ่นในกรณีของเชือกเป็นแรงหนืดในกรณีของของเหลว ความเข้าใจดังกล่าวเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเครื่องพิมพ์สามมิติ ณ ปัจจุบัน การทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ คือให้หัวฉีดของเหลวเคลื่อนที่ และฐานข้างล่างนิ่งในอนาคตกอาจให้ฐานข้างล่างเกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนไปด้วยลักษณะของชิ้นตัวอย่างบนฐานไม่ว่าจะเป็นชิ้นไหน จำต้องอาศัยการศึกษาอย่างเป็นระเบียบระบบในกรณีที่ย่างที่สุดก่อน คือการหมุน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค อำนวยพล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการ อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ๆ เพื่อการปรับปรุงแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้เหมาะสม ตลอดจนเป็นผู้อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการดำเนินการวัดและการทดลองตลอดทั้งโครงการนี้รวมถึงให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ

เอกสารอ้างอิง

1. Blount MJ. Bending and buckling of a falling viscous thread [Doctoral thesis]. Cambridge: Cambridge university. 2010.

2. Travers AA, Thompson JMT. An introduction to the mechanics of DNA. Phil Trans R Soc Lond. 2004;362(1820):1265-79.
3. Singh AR, Giri D, Kumar S. Conformational properties of polymers. Springer-Verlag. 2008; 71(2):283-95.
4. Wolgemuth CW, Powers TR, Goldstein RE. Twirling and whirling: viscous dynamics of rotating elastic filaments. Phys Rev Lett. 2000;87(7):1623-6.
5. Dias MA, Dudte LH, Mahadevan L, Santangelo CD. Geometric Mechanics of Curved Crease Origami. Phys Rev Lett. 2012;109(11):114-301.
6. Kantor Y. Knots in Polymers. Pramana – J Phys. 2005;64(6):1011-7.
7. Raymer DM, Smith DE. The tangled web of self-tying knots. PNAS. 2007;104(44):17243-4.
8. Habibi M, Ribe NM, Bonn D. Coiling of elastic ropes. APS P. 2007;99(15):154-302.
9. Amnuanpol S. Rope coiling. Pramana – J Phys. 2017;89(69):68-78.
10. Amnuanpol S. Shape sequence of rope coiling on a rotating plane. 2019;125:54001.



การเตรียมนีโอโซมสารสกัดจากเมาสำหรับผลิตภัณฑ์บำรุงผิว

Preparation of Mao (*Antidesma thwaitesianum* Muell.Arg) Extract Niosomes for Skin Care Product

สุภากาญจน์ พรหมขันธ* ชนิษฐา วงศ์บาสก์ และ ศุภฤชชญา เหมะธูลิน

Supakarn Promkhan* Chanidda Wongbasg and Sukrichaya Hemathulin

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160

Department of Food Science and Technology, Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon 47160, THAILAND

*Corresponding author e-mail: s_promkhan@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: November 10, 2021

Revised: April 29, 2022

Accepted: June 21, 2022

Available online: June 24, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.11

Keywords: Mao extract, niosome, skin care product

The objective of this research was to utilize the residual black Mao pulp and seeds from the production process of Mao products. In the niosome form of Mao extract and applied in skin lotion product. The extracting the residual black Mao pulp with 50% concentration of ethanol solution, it was found that 100 ml of the extract contained all phenolic compound, total anthocyanin and antioxidant capacity compared to ascorbic acid at the highest of 3,725.27 mg gallic acid, 28.57 mg cyanidin-3-glucoside and 3,570.33 mg ascorbic acid, respectively. The Mao extract was developed into niosomes by Chloroform film method and the particle sizes were reduced by Ultrasonic probe and Microfluidizer. The ratio of Tween 60 and cholesterol at 30: 70 was used. The particle size of Mao extract niosome was 252.19 nm and polydispersity index (PDI) was 0.26. Niosomes colloid of 2% Mao extract had antioxidant activity at 84.11 mg ascorbic acid/ 100ml, total phenolic acid at 78.10 mg gallic acid/100ml, total anthocyanin at 3.78 mg cyanidin-3-glucoside/100ml and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) at 7,775.71 μ mol

TE/100ml. From the application of Mao extract niosomes in skin care product (10%), it was showed that the product had antioxidant activity at 9.12 mg ascorbic acid/100ml, total phenolic acid at 41.86 mg gallic acid/100ml, ORAC at 678.04 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$, total anthocyanin at 0.27 mg cyanidin-3-glucoside/100ml and anti-tyrosinase efficient (IC_{50}) less than 1,000 mg/ml.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์จากและเมล็ดแมงคุดาเคาะเปลือกจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากแมง ในรูปแบบนีโอโซมของสารสกัดจากแมงและประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว โดยการสกัดจากแมงคุดาด้วยสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 พบว่าสารสกัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด แอนโธไซยานินทั้งหมดและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเมื่อเทียบกับวิตามินซีสูงสุด 3,725.27 mg gallic acid, 28.57 mg cyanidin-3-glucoside และ 3,570.33 mg ascorbic acid ตามลำดับ ทำการกักเก็บสารสกัดจากแมงที่ได้ในรูปแบบนีโอโซมด้วยวิธี Chloroform film method ลดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Ultrasonic probe และ Microfluidizer อัตราส่วนระหว่าง Tween 60 ต่อคอเลสเตอรอล ที่เหมาะสม คือ 30:70 ให้นีโอโซมของสารสกัดจากแมงที่มีขนาดอนุภาค 252.19 nm มีค่าการกระจายตัวของอนุภาค (PDI) 0.26 โดยคอลลอยด์ นีโอโซมสารสกัดจากความเข้มข้น ร้อยละ 2 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 84.11 mg ascorbic acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 78.10 mg gallic acid/100ml ปริมาณแอนโธไซยานิน 3.78 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ORAC) 7,775.71 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$ จากการประยุกต์ใช้นีโอโซมสารสกัดจากแมงในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว (ร้อยละ 10) พบว่า ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 9.12 mg ascorbic

acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 41.86 mg gallic acid/100ml มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ORAC) 678.04 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$ ปริมาณแอนโธไซยานิน ทั้งหมด 0.27 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสเล็กน้อยโดยมีค่า IC_{50} น้อยกว่า 1,000 mg/ml

คำสำคัญ: สารสกัดแมง นีโอโซม ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว

บทนำ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้จากสารสกัดจากธรรมชาติในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางมากขึ้น [1] รายงานว่า มีการใช้ประโยชน์จากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากธรรมชาติเพื่อใช้ในการลดริ้วรอย เช่น นำสารสกัดจากผล Indian Barberry (*Berberis aristata* DC.) ซึ่งเป็นผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ที่เป็นพืชท้องถิ่นของประเทศอินเดียและพบได้ทั่วไปในพื้นที่แถบทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผสมกับน้ำผึ้งสามารถลดริ้วรอยจากแผลเป็น [2] ป้องกันการเกิดสิว [3] นอกจากนั้น Kim et al. [4] พบว่า สาร Berberine ที่สกัดได้จากผล *B. aristata* สามารถยับยั้งการอักเสบของผิวหนังเนื่องจากรังสียูวี และกระบวนการเสื่อมสภาพของโปรตีนที่ผิวหนังและริ้วรอยที่เกิดจากวัย โดยเฉพาะแมงที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา เช่น ฤทธิ์ในการต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ทั้งนี้พบว่า สารสกัดจากเมล็ดและกากแมงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 97.32-

130.02 mg gallic acid/g และพบว่าสารสกัดจากเมล็ดและกากเมล็ดมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity) โดยมีค่า IC_{50} (50% inhibition concentration) 0.85-1.21 $\mu\text{g/ml}$ [5] สำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ธรรมชาติหรือสารสังเคราะห์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์บำรุงผิวต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่มีผลต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความคงตัว และการดูดซึมของสารสำคัญหรือสารออกฤทธิ์ เป็นต้น [6] ดังนั้นการพัฒนาคุณสมบัติด้านความสามารถในการดูดซึมของสารต้านอนุมูลอิสระและรูปแบบของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์จากกากและเมล็ดเมล็ดในรูปแบบสารสกัด พัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพระบบการนำส่งและการกักเก็บสารในรูปแบบนีโอโซมของผลิตภัณฑ์บำรุงผิวผสมสารสกัดจากเมล็ด เพื่อให้สารต้านอนุมูลอิสระมีความคงตัวและสามารถซึมผ่านผิวหนังเข้าสู่ตำแหน่งการออกฤทธิ์ได้ดีขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

เตรียมตัวอย่างกากและเมล็ดเมล็ด โดยนำกากเมล็ดและเมล็ดเมล็ดที่เหลือจากกระบวนการผลิตเครื่องดื่มมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ เก็บในตู้แช่เย็น อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การสกัดสารสกัดจากเมล็ด

ศึกษาวิธีการสกัดสารสกัดจากกากและเมล็ดเมล็ด โดยศึกษาตัวแปร 2 ปัจจัย ได้แก่ ส่วนของเมล็ด 2 ชนิด (กากเมล็ดและเมล็ดเมล็ด) และตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด 3 ชนิด (น้ำ Deionized water (DI), เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 และร้อยละ 100) วางแผนการทดลองแบบ 2x3 Factorial in CRD ทำการทดลอง 3 ซ้ำ สกัดด้วยตัวทำละลายในอัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร เขย่าที่อัตราเร็วคงที่ 150 รอบต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เหยี่ยแยกส่วนใสด้วยเครื่องเหวี่ยงเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที นาน 15 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 [7] จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ (Rotary Evaporator) เก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์คุณภาพของสารสกัดเมล็ด ได้แก่ ประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระด้วยวิธีการต้านการเปลี่ยนแปลงของสาร DPPH (2, 2-diphenyl-2-picrylhydrazyl hydrate) [8] วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Reagent [9] และวิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดด้วยวิธี pH differential [10]

การกักเก็บสารสกัดจากเมล็ดในรูปแบบนีโอโซม

ศึกษาการกักเก็บสารสกัดจากเมล็ดร้อยละ 2 ในรูปแบบนีโอโซม โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) กับคอเลสเตอรอล ในอัตราส่วน 30:70, 40:60, และ 50:50 เตรียมนีโอโซมด้วยวิธี Chloroform film method ดัดแปลงจาก Manosroi et al. [11] วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ลดขนาดอนุภาคด้วย Ultrasonic probe ที่คลื่นความถี่ 40 amplitude เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกโลหะหนักที่อาจปะปนอยู่ในสารสกัดด้วยเครื่องเหวี่ยงเหวี่ยง (Centrifuge) ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำไปลดขนาดอนุภาคอีกครั้งด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาค (Microfluidize) ที่ความดัน 15,000 psi 4 รอบ เก็บรักษาในขวด สีชา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์คุณภาพนีโอโซมสารสกัดเมล็ด ได้แก่ ขนาดอนุภาคและความคงตัวของนีโอโซมด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Zetasizer) ประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ด้วยวิธีการต้านการเปลี่ยนแปลงของสาร DPPH ปริมาณสารประกอบ

ฟีนอลิก ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu [9] และปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดด้วยวิธี pH differential [10]

การประยุกต์ใช้นิโอมสารสกัดในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว

นำสารสกัดจากเม่าที่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบนิโอมมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิวที่ผ่านการพัฒนาสูตร โดยมีส่วนผสมของคอลลอยด์นิโอมสารสกัดในปริมาณร้อยละ 10 ไม่ผ่านการแต่งสีและกลิ่น วิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ค่าสี L^* , C^* และ h° ด้วยเครื่องวัดสี (ColorFlex รุ่น CX 1498) ค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield (หัววัดเบอร์ 64S ความเร็วรอบ 10 rpm) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย pH meter รุ่น pH 320 ประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระด้วยวิธีการต้านการเปลี่ยนแปลงของสาร DPPH [8] ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Reagent [9] ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดด้วยวิธี

pH differential [10] วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ORAC (Oxygen radical absorbance capacity) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Prior et al. [12] และวิเคราะห์ฤทธิ์ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ไทโรซิเนสด้วยวิธี Dopachome โดยดัดแปลงจากวิธีของ Long et al. [13] และค่าคุณภาพทางจุลินทรีย์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 478-2555 [14]

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

คุณภาพสารสกัดจากเม่า

จากการวิเคราะห์คุณภาพปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากเม่า พบว่า ส่วนประกอบของเม่าและตัวทำละลายที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเมล็ดและกากเม่าดำ

ตัวอย่าง	สารละลายที่ใช้สกัด	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ	ฟีนอลิก	ปริมาณสารแอนโทไซยานิน
		(mg Ascorbic acid/100ml)	(mg Gallic acid/100ml)	(mg Cyanidin-3-glucoside/100ml)
เมล็ดเม่าดำ	น้ำ	932.11 $\pm$ 2.45 ^d	1,628.14 $\pm$ 0.61 ^e	4.57 $\pm$ 0.37 ^c
	เอทานอลร้อยละ 50	1,894.33 $\pm$ 8.53 ^b	2,888.94 $\pm$ 3.39 ^b	9.16 $\pm$ 0.94 ^b
	เอทานอลร้อยละ 100	971.67 $\pm$ 2.82 ^d	1,717.77 $\pm$ 1.17 ^d	2.23 $\pm$ 0.43 ^d
กากเม่าดำ	น้ำ	1,613.78 $\pm$ 2.58 ^c	2,412.98 $\pm$ 3.28 ^c	11.15 $\pm$ 0.11 ^b
	เอทานอลร้อยละ 50	3,570.33 $\pm$ 1.10 ^a	3,725.27 $\pm$ 1.54 ^a	28.57 $\pm$ 1.07 ^a
	เอทานอลร้อยละ 100	554.11 $\pm$ 0.94 ^e	605.74 $\pm$ 1.31 ^f	4.69 $\pm$ 0.06 ^c

หมายเหตุ^{a-f} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุดในแนวดิ่งที่มีตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตัวเลขหลังเครื่องหมาย $\pm$ หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของข้อมูล

เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเม่า พบว่า สารสกัดจากกากเม่าดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด คิดเป็น 3,570.33 mg ascorbic acid/100 ml ซึ่งสูงกว่าสารสกัดจากเมล็ดเม่าดำ แต่เมื่อสกัดด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 100 พบว่า

สารสกัดจากเมล็ดเม่าดำมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสารสกัดจากกากเม่าดำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในเมล็ดเม่ามีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สามารถละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วสูงกว่าในกากเม่า [15] กล่าวว่เมื่อระดับความเข้มข้นของตัวทำละลายมี

ความเป็นขั้วที่เหมาะสมกับตัวถูกละลายจะทำให้สามารถสกัดสารได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดจากกากและเมล็ดเม่าดำพบว่าสารสกัดจากกากเม่าดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอล ร้อยละ 50 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด 3,725.27 mg gallic acid/100 ml โดยเมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่เท่ากัน พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้จากกากและเมล็ดเม่ามีทิศทางเช่นเดียวกับการความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันได้ดีทั้งในระบบอาหารและร่างกาย [16] โดยสารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงขึ้นด้วย [17] นอกจากนี้สารประกอบ ฟีนอลิกยังมีฤทธิ์ในการต้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง และยังช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันทำงานดีขึ้น ซึ่งจะมีผลยับยั้งความเสื่อมสภาพของผิวหนังและยังป้องกันการเกิดมะเร็งผิวหนังได้เช่นกัน [6]

ส่วนปริมาณสารแอนโธไซยานินทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี pH differential โดยสารสกัดจากเม่าดำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 523 นาโนเมตร แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เจือจางด้วยบัฟเฟอร์ที่มี pH 1.0 และ 4.5 ที่ความยาวคลื่น 523 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด ซึ่งแสดงในรูปของ cyanidin-3-glucoside พบว่า สารสกัดจากกากเม่าดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 มีปริมาณสารแอนโธไซยานินทั้งหมดสูงที่สุดคิดเป็น 28.57 mg cyanidin-3-glucoside/100 ml และเมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่เท่ากันพบว่า สารสกัดจากกากเม่าดำมีปริมาณสารแอนโธไซยานินสูงกว่าสารสกัดจากเมล็ดเม่าดำในทุกตัวทำละลาย

จากการพิจารณาค่าคุณภาพของสารสกัดจากกากและเมล็ดเม่าดำด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน

พบว่าสารสกัดจากกากเม่าดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น ร้อยละ 50 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 3,570.33 mg ascorbic acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 3,725.27 mg gallic acid/100ml และปริมาณสารแอนโธไซยานินทั้งหมด 28.57 mg cyanidin-3-glucoside/100ml สูงที่สุด ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง พบว่า สารต้านอนุมูลอิสระมีบทบาทในการป้องกันเซลล์ผิวหนังจากการถูกทำลาย จึงใช้ป้องกันหรือชะลอความเหี่ยวของผิวหนังได้ [18] อนุมูลอิสระที่มีผลต่อโครงสร้างของผิวหนังที่พบเป็นส่วนใหญ่คือ Reactive Oxygen Species (ROS) โดย พบว่า ร้อยละ 80 ของอนุมูลอิสระชนิดนี้เกิดจากรังสี UV ทั้งรังสี UVA คิดเป็นร้อยละ 95-98 และรังสี UVB ร้อยละ 2-5 [19] ROS จะส่งผลต่อความกระชับตึง และความยืดหยุ่นของผิว ซึ่งเป็นสาเหตุของผิวแห้งเสียและการเกิดริ้วรอย [20] สารแอนโธไซยานินที่ได้จากผลไม้ตระกูลเบอร์รี่มีความสามารถในการป้องกันรังสี และป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ [21] โดยมีการนำสารสกัดจากผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ผสมในผลิตภัณฑ์บำรุงผิวทั้งในครีมกลางวันและกลางคืน [6] รายงานว่าสารในกลุ่มแอนโธไซยานิน มีผลทำให้สุขภาพผิวดีขึ้นและมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเกิดมะเร็งผิวหนังอีกด้วย ดังนั้นการใช้สารสกัดจากกากเม่าในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิวอาจช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้ เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากเม่า จึงเลือกสารสกัดจากกากเม่าดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 ไปกักเก็บสารในรูปแบบนีโอโซมในขั้นตอนต่อไป

การกักเก็บสารสกัดจากเม่าในรูปแบบนีโอโซม

การกักเก็บสารสกัดในรูปแบบนีโอโซมและลดขนาดของอนุภาคด้วยคลื่นความถี่สูงร่วมกับแรงดันสูงทำให้สารเกิดการแตกตัวแล้วกลับมาเรียงตัวใหม่ โดยมีขนาดเล็กและมียูนาที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยอนุภาค

คอลลอยด์นีโอโซมที่ได้มีขนาด 145.18 - 252.19 นาโนเมตร มีสีม่วงเข้มและไม่ตกตะกอน และเมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของคอลลอยด์นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟ พบว่า อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Tween 60) ต่อคอเลสเทอรอล ที่แตกต่างกันมีผลต่อขนาดของอนุภาคและค่าการกระจายตัว (PDI) ของคอลลอยด์นีโอโซม แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 2 พบว่า คอลลอยด์ นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 145.18-252.19 นาโนเมตร โดยนีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Tween 60 ต่อ คอเลสเทอรอล ในอัตราส่วน 30:70 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุด คือ 252.19 นาโนเมตร และอัตราส่วน 50:50 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด คือ 145.18 นาโนเมตร ทั้งนี้เนื่องจากคอเลสเทอรอลมีผลในการเพิ่มขนาดและประสิทธิภาพในการกักเก็บสาร [22] ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Pongphisut [23] ที่ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 61) กับคอเลสเทอรอลต่อคุณสมบัติของนีโอโซมโปรตีนไหม พบว่า อนุภาคของนีโอโซมโปรตีนไหมที่ใช้อัตราส่วน 30:70 มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด คือ 92.42 นาโนเมตร รองลงมาคืออัตราส่วน 40:60 และ 50:50 โดยมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 64.82 และ 60.60 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการ

กระจายตัวของอนุภาค (Polydispersity Index; PDI) ที่เป็นการวัดค่าทางกายภาพที่นิยมใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุภาคนีโอโซม เป็นตัวชี้วัดความสม่ำเสมอของน้ำหนักรวมและขนาดโมเลกุลในคอลลอยด์ ซึ่งถ้าอนุภาคนีโอโซมมีค่าการกระจายตัวของอนุภาคต่ำ แสดงว่าอนุภาคของนีโอโซมที่ได้มีความสม่ำเสมอ ขนาดใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ และมีความคงตัวของคอลลอยด์นีโอโซมสูง จากผลการทดลอง พบว่า ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (PDI) ของคอลลอยด์นีโอโซมที่เตรียมได้ค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.26-0.63 โดยนีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Tween 60 ต่อ คอเลสเทอรอล เท่ากับ 30:70 มีค่าการกระจายตัวต่ำที่สุด คือ 0.26 แสดงว่าอนุภาคในระบบคอลลอยด์มีความสม่ำเสมอ ทำให้ระบบคอลลอยด์มีความคงตัวมากที่สุด รองลงมา คืออัตราส่วน 40:60 และ 50:50 ที่มีค่าการกระจายตัวของอนุภาค เท่ากับ 0.44 และ 0.63 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Pongphisut [23] ที่พบว่า คอลลอยด์นีโอโซมโปรตีนไหมที่มีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 61) กับ คอเลสเทอรอล 30:70 มีค่าการกระจายตัวต่ำที่สุด คือ 0.22 ต่ำกว่าที่อัตราส่วน 40:60 และ 50:50 ที่มีค่าการกระจายตัวเท่ากับ 0.33 และ 0.47 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าคุณภาพทางกายภาพของคอลลอยด์นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำความเข้มข้นร้อยละ 2 ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) : คอเลสเทอรอล ที่ระดับต่าง ๆ

อัตราส่วน	ขนาดอนุภาค	การกระจายตัว
Tween 60 : คอเลสเทอรอล	(nm)	ของอนุภาค (PDI)
30:70	252.19 ± 4.83 ^c	0.26 ± 0.02 ^a
40:60	204.28 ± 5.97 ^b	0.44 ± 0.20 ^b
50:50	145.18 ± 6.23 ^a	0.63 ± 0.10 ^c

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุดในแนวตั้งที่มีตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของข้อมูล

และจากการวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางเคมีของคอลลอยด์นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำความเข้มข้น

ร้อยละ 2 พบว่า อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อ คอเลสเทอรอลที่แตกต่าง

กัน มีผลต่อค่าคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณสารแอนโทไซยานิน ที่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของคอลลอยด์นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำอยู่ในช่วง 73.69-84.11 mg ascorbic acid/100ml โดยนีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำที่อัตราส่วนระหว่าง Tween 60 ต่อ คอเลสเทอรอล เท่ากับ 30:70 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด 84.11 mg ascorbic acid/100ml และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด 78.10 mg gallic acid/100ml ซึ่งมากกว่าสารสกัดจากกากกาแฟที่ไม่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบนีโอโซม (Control) ส่วนปริมาณสารแอนโทไซยานินพบว่า นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำที่อัตราส่วนระหว่าง Tween 60 ต่อคอเลสเทอรอล เท่ากับ 30:70 และ 40:60 มีปริมาณสารแอนโทไซยานินสูงสุด 3.78 และ 3.75 mg cyanidin-3-glucoside/100ml ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบนีโอโซมเช่นกัน โดยสารสกัดจากกาแฟดำที่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบนีโอโซม ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อ คอเลสเทอรอล เท่ากับ 30:70 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณสารแอนโทไซยานินสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากคอเลสเทอรอลมีคุณสมบัติในการเพิ่มความคงตัวและป้องกันการรั่วไหลของสารที่กักเก็บในอนุภาคนีโอโซม โดยประสิทธิภาพในการกักเก็บสารของอนุภาคนีโอโซมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคอเลสเทอรอลที่เพิ่มขึ้น [24] นอกจากนั้นคอเลสเทอรอลยังมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บยา เนื่องจากช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผนังอนุภาคนีโอโซม และลดอัตราการปลดปล่อยตัวยาลง โดย Yoshida et al. [22] และ Pongphisut [23] ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 61) กับ คอเลสเทอรอลต่อคุณสมบัติของนีโอโซมโปรตีนไหม พบว่า ผงนีโอโซมโปรตีนไหมที่เตรียมได้จากอัตราส่วนระหว่าง Tween 61 ต่อคอเลสเทอรอล 30:70 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด โดยมีค่า SC_{50} เท่ากับ 75.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม เมื่อเทียบกับในอัตราส่วน 40:60 และ 50:50 ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (SC_{50}) เท่ากับ 84.22 และ 111.57 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ และยังพบว่าที่อัตราส่วน 30:70 มีปริมาณร้อยละของโปรตีนสูงสุด คือ ร้อยละ 2.52 ในขณะที่อัตราส่วน 40:60 และ 50:50 มีโปรตีนร้อยละ 2.37 และ 2.06 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของคอลลอยด์นีโอโซมสารสกัดจากกากกาแฟดำความเข้มข้น ร้อยละ 2 ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) : คอเลสเทอรอล ที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบนีโอโซม

อัตราส่วน	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (mg Ascorbic acid/100ml)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (mg Gallic acid/100ml)	ปริมาณสารแอนโทไซยานิน (mg Cyanidin-3-glucoside/100ml)
Tween 60 : คอเลสเทอรอล			
Control	80.82± 3.47 ^b	74.13± 0.94 ^b	3.49± 0.01 ^b
30:70	84.11± 1.46 ^a	78.10± 0.39 ^a	3.78± 0.02 ^a
40:60	80.53± 2.03 ^b	74.27± 0.14 ^b	3.75± 0.02 ^a
50:50	73.69± 1.57 ^c	66.85± 0.63 ^c	3.46± 0.02 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละชุดในแนวดิ่งที่มีตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของข้อมูล

เมื่อพิจารณาค่าปัจจัยทางคุณภาพของคอลลอยด์นีโอโชมสารสกัดจากกากมะดำ ได้แก่ ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (PDI) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณสารแอนโธไซยานิน พบว่า อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อคอเลสเทอรอลที่เหมาะสมในการเตรียมนีโอโชมสารสกัดจากกากมะดำ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ คือ 30:70 เนื่องจากคอลลอยด์นีโอโชมที่ได้ มีค่าการกระจายตัวของอนุภาคต่ำที่สุด แสดงถึงขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ทำให้ระบบคอลลอยด์มีความคงตัว นอกจากนี้ยังพบว่า คอลลอยด์นีโอโชมที่ได้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิก และปริมาณสารแอนโธไซยานินสูงที่สุด และจากการตรวจวัดความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ORAC ซึ่งเป็นการวัดฤทธิ์ต้านออกซิเดชันที่อาศัยหลักการถ่ายเทไฮโดรเจนอะตอมโดยสารต้านออกซิเดชันจะกำจัดอนุมูลอิสระเปอร์ออกซิล ทำให้ Fluorescent probe คงตัวมากขึ้น การเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์คงตัวอยู่ได้นานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีสารต้านออกซิเดชัน [25] พบว่า คอลลอยด์นีโอโชมสารสกัดจากกากมะดำที่ใช้อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อคอเลสเทอรอลเท่ากับ 30:70 มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน 7,775.71 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$

การประยุกต์ใช้นีโอโชมสารสกัดจากมะในผลิตภัณฑ์บำรุงผิว

นำคอลลอยด์นีโอโชมสารสกัดมะที่สกัดด้วยสารละลาย เอทานอลร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อคอเลสเทอรอลเท่ากับ 30:70 ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว พบว่า ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวมีสีชมพูอมน้ำตาลซึ่งเป็นสีธรรมชาติของนีโอโชมสารสกัดจากมะ มีค่าความหนืด 13,964 cP ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5.12 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 9.12 mg

ascorbic acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 41.86 mg gallic acid/100ml ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ORAC) 678.04 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$ ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด 0.27 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสเล็กน้อยโดยมีค่า IC_{50} น้อยกว่า 1,000 mg/ml ส่วนคุณภาพทางจุลินทรีย์ พบว่า ผลิตภัณฑ์บำรุงผิวผสมสารสกัดจากมะมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม โดยไม่พบเชื้อจุลินทรีย์สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans* และ *Clostridium* spp. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.478-2555 [14]

สรุปผล

สารสกัดที่เหมาะสมสำหรับนำมาเก็บกักเก็บในรูปแบบนีโอโชมและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิวผสมสารสกัดจากมะ คือ สารสกัดจากกากมะดำที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอลร้อยละ 50 มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 3,570.33 mg ascorbic acid/100 ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 3,725.27 mg gallic acid/100ml ปริมาณสารแอนโธไซยานินทั้งหมด 28.57 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และเมื่อกักเก็บสารสกัดจากกากมะดำความเข้มข้นร้อยละ 2 ในรูปแบบนีโอโชมด้วยวิธี Chloroform film method โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุผิว (Tween 60) ต่อ คอเลสเทอรอลที่เหมาะสม คือ 30:70 คอลลอยด์นีโอโชมสารสกัดมะมีขนาดอนุภาค 252.19 นาโนเมตร ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (PDI) ค่อนข้างต่ำ คือ 0.26 และมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารสกัดจากมะที่ไม่ผ่านการกักเก็บในรูปแบบ นีโอโชม โดยมีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ORAC) 7,775.71 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 84.11 mg ascorbic acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

78.10 mg gallic acid/100ml ปริมาณสารแอนโธไซยานิน 3.78 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และเมื่อประยุกต์ใช้เนื้อโสมสารสกัดจากเฝือกในผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว (ร้อยละ 10) พบว่าผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (ORAC) 678.04 $\mu\text{mol TE}/100\text{ml}$ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 9.12 mg ascorbic acid/100ml ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 41.86 mg gallic acid/100ml ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด 0.27 mg cyanidin-3-glucoside/100ml และมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสเล็กน้อยโดยมีค่า IC_{50} น้อยกว่า 1,000 mg/ml และไม่พบเชื้อจุลินทรีย์สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans* และ *Clostridium* spp.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ ขอขอบคุณ รศ.ดร.วัชร คุณกิตติ และ ผศ.ดร.สุพัตรา ปรศุพัฒนา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการทำวิจัยจนแล้วเสร็จ

เอกสารอ้างอิง

- Mukherjee PK, Niladr Mi, Neelesh KN, Birendra KS. Bioactive compounds from natural resources against skin aging. J Phytomedicine. 2011;19(1):64-73.
- Nadkarni AK. Indian Materia Medical (Revised and Enlarged). vol.II. 3rd ed. Popular Book Depot: Bombay; 1976.
- Mamgain RK. Acne Vulgaris and its Treatment by Indigenous Drugs SK34 (Purim) and SK-235 (Clarina). the Antiseptic. 2000;97(3):76-8.
- Kim S, Chung JH. Berberine prevents UV-induced MMP-1 and reduction of type I procollagen expression in human dermal fibroblasts. Phytomedicine J. 2008;15(9):749-53.
- Puangpronpitag D, Areejitranusorn P, Boonsiri P, Suttajit M Yongvanit P. Antioxidant activities of polyphenolic compounds isolated from *Antidesma thwaitesianum* Müll. Arg. seeds and marcs. J Food Sci. 2008;73(9):C648-53.
- Panich A. Antioxidants and the inhibition of skin aging. In: Angwanith V, editor. Free radicals and antioxidant. Health Innovation Publishing; 2012. Thai.
- Promkhan S, Wongbasg C, kumpita A. [Utilization of black Mao pomace extract in hand cleansing gel product]. JARST. 2018;17(1):23-32. Thai.
- Karakaya S, El SN, TAS AA. Antioxidant activity of some foods containing phenolic compounds. International J Food Sciences and Nutrition. 2001;52(6):501-8.
- Daduang J, Vichitphan S, Daduang S, Hongsprabhas P, Boonsiri P. High phenolics and antioxidant of some tropical vegetables related to antibacterial and anticancer activities. AFR J Pharm Pharmacol. 2011;5(5):608-15.
- Giusti MM, Wrolstad RE. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-Visible spectroscopy. In: Wrolstad RE, editor. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. New

- York: John Wiley & Sons Inc.; 2001. p. F1.2.1-F1.2.13.
11. Manosroi A, Wongtrakul V, Manosroi J, Sakai H, Sugawara F, Yuasa M, et al. Characterization of vesicles prepares with various non-ionic surfactants mixed with cholesterol. *J Colloids Surfaces*. 2003;30:129-38.
 12. Prior RL, Hoang H, Gu L, Wu X, Bacchiocca M, Haward L, et al. Assays for hydrophilic and lipophilic antioxidant capacity (oxygen radical absorbance capacity (ORAC_{FL})) of plasma and other biological and food samples. *J Agr Food Chem*. 2003;51:3273-9.
 13. Long ZP, Park HR, Park YK, Lee SK, Park JH, Park MK. Mushroom tyrosinase inhibition activity of some chromones. *J Chem Pharm Bull*. 2002;50(3):309-11.
 14. Thai Industrial Standards Institute. Standards industry of skin products. TIS. 478-2555. 2555. Thai.
 15. Loiphiman P, Phasakul T, Mongkoithai R. Comparison of antioxidant active and total phenolic compounds of fruit peels. *Agr Sci J*. 2011;42(2):385-8.
 16. Robards, K, Prenzler PD, Tucker G, Swatsitang P, Glover W. Phenolic compounds and their role in oxidative process in fruit. *J Food Chem*. 1999;66(4):401-36.
 17. Rounjacpetch A. Effect of Indian Gooseberry Browning and Spanish Plum Maturity on Total Phenolics, Flavonoids and Antioxidant Activities. [Master of Science Thesis]. Bangkok: kasetsart University; 2007. Thai.
 18. Leelapornphisit P. Cosmetics for the skin. 2nd ed. Odeon store Publishing house; 2008. P.264 Thai.
 19. Flober-Muller H, Champ S, Kandzia C, Jung K, Seifert M, Herrling T. Strategy for Efficient Prevention from photo- ageing. *SOFW J*. 2008;134(8):23-32.
 20. Mishra AK, Mishra A, Chattopadhyay P. Herbal cosmeceuticals for photoprotection from Ultraviolet B radiation. *Trop J Pharm Res*. 2011;10(3):351-60.
 21. Kusumawati I, Indrayanto G. Natural Antioxidants in Cosmetic. In: Atta-ur-Rahman, editor. *Studies in Natural Products*. Oxford United Kingdom: Elsevier press; 2013. p. 485-505.
 22. Yoshida H, Lehr CM, Kok W, Junginger HE, Verhoef JC, Bouwistra JA. Niosomes for oral delivery of peptide drugs. *J Controlled Release*. 1992;21:145-54.
 23. Pongphisut S. Developments of anti-aging cream product with silk protein niosomes. [Master of Science Thesis]. Bangkok: kasetsart University; 2011. Thai.
 24. Agarwal R, Katare OP, Vyas SP. Preparation and in vitro evaluation of liposomal/niosomal delivery systems for antipsoriatic drug dithranol. *Int J Pharmaceut*. 2001;228:43-52.
 25. Porasupatthana S. Measurement technique of Oxidative Stress. In: Angwanith V, editor. *Free radicals and antioxidant*. Health Innovation Publishing; 2012. p.129-92. Thai.



Screening for Rice Blast Resistant Genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54* in Landrace Rice Varieties of Northeastern Thailand

Chinanat Krainart¹, Ratiros Siangsai², Apinya Longya³, Sitipun Sinumporn⁴ and Sucheela Talumphai^{2*}

¹Major of agricultural innovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Department of Science and Technology, Roi Et Rajabhat University, Roi Et 45120, THAILAND

²Major of Industrial Biology, Faculty of Liberal Arts and Science, Department of Science and Technology, Roi Et Rajabhat University, Roi Et 45120, THAILAND

³Department of Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, THAILAND

⁴Thung Kula Ronghai Roi Et Campus, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, THAILAND

*Corresponding author e-mail: aor_sucheela@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: April 19, 2022

Revised: June 22, 2022

Accepted: June 23, 2022

Available online: June 28, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.12

Keywords: landrace colored-rice, landrace rice, rice, rice blast disease, rice blast resistance gene

Rice blast disease, caused by *Magnaporthe oryzae*, is one of the most frequent and significant impediments to sustainable rice production and the largest impediment to sustainable rice production. Effective control of this disease largely depends on identifying the resistant genes. In our study, 37 Thai landrace rice varieties (18 white-grain rice varieties and 13 colored-grain rice varieties) along with 6 improved white-grain rice varieties were screened for four rice blast resistant genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54* by PCR technique using the gene-specific makers. The results showed that 20 rice varieties (54.0%) contained the rice blast resistant gene *Pi9*, 11 rice varieties (29.7%) contained the rice blast resistant gene *Pita*, 22 rice varieties (59.4%) contained the rice blast resistant gene *Pigm(t)* and 23 rice varieties (62.1%) contained the rice blast resistant gene *Pi54*. All 31 Thai landrace rice varieties carried at least one rice blast resistant gene(s). Four white-grain landrace rice varieties, four colored-grain landrace rice varieties and five improved rice carried the highest

number of rice blast resistant genes at three genes, which can be used as the resistant donor in the rice breeding program. Two white-grain landrace rice varieties; Jao Dæng 2 and Mak Yom, contained one examined rice blast resistant genes. Two colored-grain landrace rice varieties; Nieow Dam (skn 3) and Kee Nok, contained all examined rice blast resistant genes. Five improved rice varieties contained three rice blast resistant genes. The information generated from this study is useful for parental selection in developing the new resistant rice varieties and breeding.

INTRODUCTION

Rice blast disease, caused by an ascomycete *Magnaporthe oryzae*, is one of the most destructive diseases of rice production worldwide [1]. It has been reported that this disease caused about 10 to 20% yield loss in regular seasons and as high as 100% yield loss in years with blast epidemics [2]. More than 100 rice blast resistant genes are mapped on different rice chromosomes, but only 22 resistant genes have been successfully cloned, namely; *Pib*, *Pita*, *Pid2*, *Pi9*, *Pi2*, *Piz-t*, *Pi36*, *Pi37*, *Pikm*, *Pi5*, *Pit*, *Pid3*, *Pi21*, *Pish*, *Pb1*, *Pik*, *Pikp*, *Pikh*, *Pia*, *Pil*, *Pi64* and *Pi50* [3]. The *Pi9* resistant gene is resistant to more than 100 Philippines rice blast isolates and 43 rice blast isolates from 13 countries [4]. The *Pita* and *Pita2* resistant genes were allelic and mapped near the centromere of chromosome 12 [5]. The *Pita* resistant gene was found in wide landrace rice varieties, including Tadukan in the Philippines, Tetep in Vietnam and Katy and Drew in the southern United States [6]. The *Pigm(t)* resistant gene confers broader-spectrum resistance

to rice blast isolates from different rice regions in China [7]. The *Pi54* resistant gene was first identified in an Indian rice cultivar HR22 and later was cloned from an indica type rice cultivar Tetep [6]. Many resistant genes have been identified in the landrace rice varieties [7].

Rice landraces have been recognized as valuable genetic resources for improving the resistance level of modern rice cultivars against biotic diseases [8]. The landrace rice varieties, originating from nine diverse rice ecologies of India, harbored a range of five to nineteen rice blast-resistant genes with a frequency varied from 4.96% to 100% [9]. Rice blast epidemics have occurred in most provinces in the north and northeast Thailand, where the most effective management and control of rice blast disease is the use of resistant rice varieties [10]. There are more than 100,000 landraces and improved and elite rice varieties in Thailand, and many exhibits resistant reactions to the rice blast disease. Villa et al. [11] reported that the rice blast resistant genes, *Pi2*, *Pi9*, *Piz-t*, *Pigm(t)*, *Pid2*, *Pid3*, *Pia*, *Pik*, *Pi54* and *Pita* were presented in Thai landrace

rice germplasm. The objective of this study was to investigate the four-rice blast resistant genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54*, in 37 Thai rice varieties, including 18 white-grain and 13 colored-grain landrace rice varieties and 6 improved rice varieties from northeastern Thailand using the gene specific primers. The results provided a list of the rice blast resistant genes in each examined Thai rice varieties and the information obtained from this study is useful for identifying the parental lines with the rice blast resistant genes in the future rice breeding programs.

MATERIALS AND METHODS

Plant materials

In total, 37 Thai rice varieties from northeastern Thailand, consisting of 18 white-grain landrace rice varieties, 13 colored-grain landrace rice varieties and 6 improved rice varieties from Sakonnaknon Rice Research Center, Puparn Royal Development Study Center for the conservation Thailand, were used in this study (Table 1, Figure 1-3). KDML105 and Nipponbare rice varieties were used as the susceptible control (Negative Control) and IRRI-inbred blast resistant lines (IRBLs) from the International Rice Research Institute (IRRI), IRBL12 (*Pita*) and IRBL22 (*Pi9*) were used as the resistant control (Positive Control).

Genomic DNA extraction

The genomic DNA extraction method was modified from Yadav et al. [12]. The leaves were ground in liquid nitrogen using a pre-cooled sterile mortar and pestle. Total DNA was

isolated using the DNA extraction buffer (including 2% CTAB, 0.1 M Tris-HCL pH 8, 1.4 M NaCl and 0.02 M EDTA, pH8) and incubated at 65°C for 90 minutes. After that, the solution was added with Chloroform: Iso-amyl alcohol (24:1) and mixed by using a vortex. Next, the mixture was centrifuged at 12,000 rpm for 15 min and transferred its upper phase to a new tube. After that 2/3–1 volume of Isopropanol was added and mixed by inverting. Next, the mixture was centrifuged at 12,000 rpm for 40 min, the supernatant was discarded, the pellet was washed in 70% ethanol, and the mixture was centrifuged at 12,000 rpm for 5 min. After that, the dried DNA pellet was then suspended in 100 µl of TE buffer (including 0.01M Tris-Cl pH 7.5 and 1mM EDTA) and frozen at -80°C for storage. DNA quality was measured using NANODROP 2000 Spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA). The DNA was migrated on 1% agarose. Stained in ethidium bromide, then visualized on UV transilluminator.

Polymerase chain reaction amplification of genes

Thirty-seven Thai rice varieties were screened for four major rice blast resistant genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54*, using gene-specific DNA markers (Table 2). PCR amplifications were performed using *Taq* polymerase (Applagen, Thailand) and ingredients by using the following PCR condition: initial denaturation for 2 min at 94°C, followed by 35 cycles of 30 s of denaturation at 94°C, 30 s of annealing depending on each marker (Table 2), 30 s of extension at 72°C and a

final extension at 72°C for 5 min. The PCR products were determined using a stained photographic system (Vilber Lourmat, Eberhardzell, Germany) of 1% agarose gel electrophoresis at 100 V for 30 min.

DNA sequencing and sequence analysis

The PCR products were purified by GF-1 AmbicClean kit (PCR and Gel) (Vivantis Technologies Sdn. Bhd., Malaysia) according to

the manufacturer's protocol. After purification, the PCR products were sent out for sequencing; by Sequence analysis of purified fragments was done by BGI tech in Hong Kong to confirm the sequence of the resistant genes. The nucleotide sequence was aligned with the reference sequences from GenBank databases with the MAFFT v7.380.



Figure 1 Eighteen white-grain landrace rice varieties; A (Leung Boonma), B (Hom Puang Ton Kieow), C (Leung khaw), D (Hom pla siw, E (Mak Khaek) , F (Khaw Hom Mai), G (Hom Daeng), H (Hom Puang Ton Muang), I (Ham Thung), J (Rai Dok Mai), K (Do Sakon), L (Tab Mei Khaw), M (Hom Jam Pla), N (Jao Dæng 2), O (Tab Mei), P (Mak Yom), Q (Phæk Hin), R (E rai)

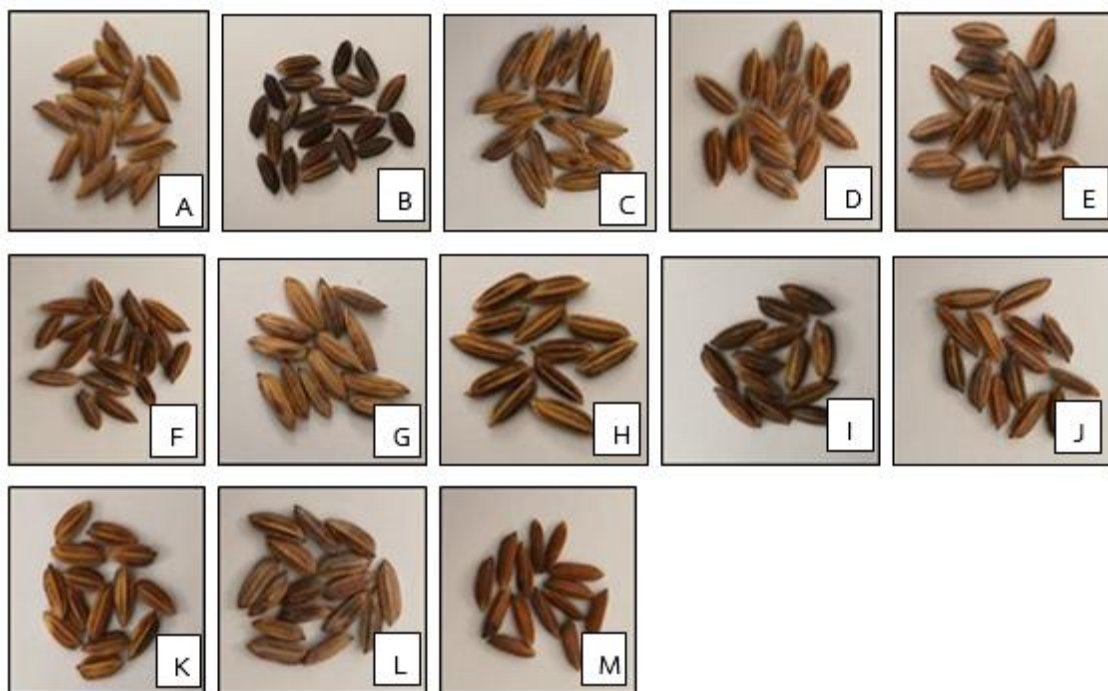


Figure 2 Thirteen colored-grain landrace rice varieties; A (Kee Nok), B (MayomNakhon Phanom), C (kee tom Hang Nak), D (Kæen Khu), E (Hom Nan Pon), F (Tab Mei Dom), G (Kab Yang 1), H (E mud), I (Kee Tom Ngan), J (Nieow Dam (skn 3)), K (Gom Na Nok Khea Na), L (Mae Phueng), M (Mafi Dam)



Figure 3 6 Improved rice varieties; A (Phu Phan 1 (75)), B (Phu Phan 1 (57)), C (Phu Phan 2), D (Phu Phan 1 (59)), E (Phu Phan 1 (58)), F (KD 6)

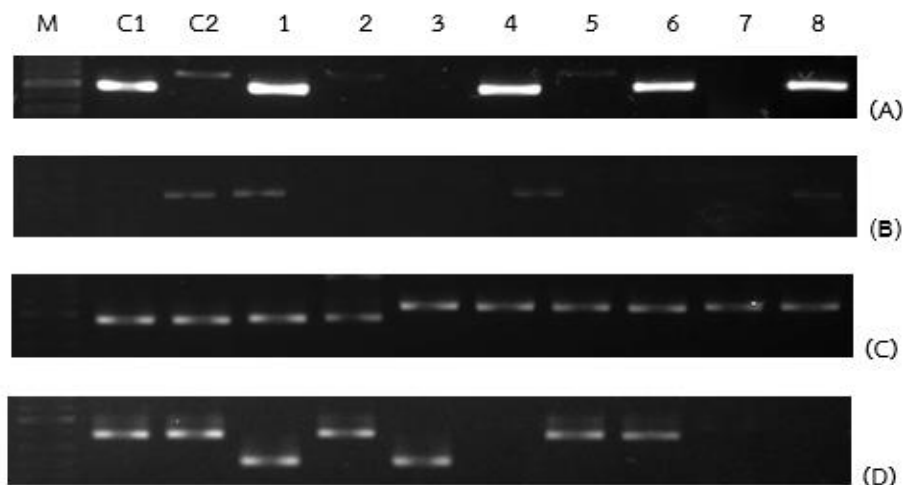


Figure 4 Gel electrophoresis detection of rice blast resistant allele using four *R* gene-specific primers, pB8 primer (A), *Pi54* MAS primer (B), S29747 primer (C) and YL155/YL8 primer (D), 1-8 represented individual rice sample; C1 Nipponbarae (Negative Control), C2 IRBL22 resistance line with *Pi9* (Positive Control)

Table 1 Thirty-seven Thai rice varieties used in the rice blast resistant gene investigation

No.	Local Name	Varieties (Seed Color)	<i>Pi9</i> gene	<i>Pita</i> gene	<i>Pigm(t)</i> gene	<i>Pi54</i> gene	Total <i>R</i> gene(s)
1.	Leung Boonma	Landrace (W)	+	+	-	+	3
2.	Hom Puang Ton Kieow	Landrace (W)	-	-	-	-	0
3.	Leung khaw	Landrace (W)	-	-	+	+	2
4.	Hom pla siw	Landrace (W)	+	-	+	-	2
5.	Mak Khaek	Landrace (W)	-	+	+	-	2
6.	Khaw Hom Mai	Landrace (W)	+	-	+	-	2
7.	Hom Daeng	Landrace (W)	-	-	+	-	1
8.	Hom Puang Ton Muang	Landrace (W)	+	-	+	-	2
9.	Ham Thung	Landrace (W)	+	+	+	-	3
10.	Rai Dok Mai	Landrace (W)	+	+	-	+	3
11.	Do Sakon	Landrace (W)	+	+	-	-	2
12.	Tab Mei Khaw	Landrace (W)	+	-	+	-	2
13.	Hom Jam Pla	Landrace (W)	-	-	-	-	0
14.	Jao Dæng 2	Landrace (W)		+	-	-	1
15.	Tab Mei	Landrace (W)	+	-	+	-	2
16.	Mak Yom	Landrace (W)	-	+	-	-	1

No.	Local Name	Varieties (Seed Color)	<i>Pi9</i> gene	<i>Pita</i> gene	<i>Pigm(t)</i> gene	<i>Pi54</i> gene	Total <i>R</i> gene(s)
17.	Phak Hin	Landrace (W)	-	-	-	-	0
18.	E rai	Landrace (W)	-	+	+	+	3
19.	Kee Nok	Landrace (Br)	+	-	-	+	2
20.	MayomNakhon Phanom	Landrace (Bl)	-	-	+	+	2
21.	kee tom Hang Nak	Landrace (Br)	-	-	+	+	2
22.	Kaen Khu	Landrace (Br)	+	-	-	+	2
23.	Hom Nan Pon	Landrace (Br)	+	-	+	+	3
24.	Tab Mei Dom	Landrace (Br)	-	-	+	+	2
25.	Kab Yang 1	Landrace (Br)	-	-	+	+	2
26.	E mud	Landrace (Bl)	+	+	-	+	3
27.	Kee Tom Ngan	Landrace (Br)	+	+	-	+	3
28.	Nieow Dam (skn 3)	Landrace (Br)	-	-	-	+	1
29.	Gom Na Nok Khea Na	Landrace (Bl)	-	-	+	+	2
30.	Mae Phueng	Landrace (Br)	-	+	+	+	3
31.	Mafi Dam	Landrace (Br)	-	-	-	+	1
32.	Phu Phan 1 (75)	Improve (W)	+	-	+	+	3
33.	Phu Phan 1 (57)	Improve (W)	+	-	+	+	3
34.	Phu Phan 2	Improve (W)	+	-	-	+	2
35.	Phu Phan 1 (59)	Improve (W)	+	-	+	+	3
36.	Phu Phan 1 (58)	Improve (W)	+	-	+	+	3
37.	KD 6	Improve (W)	+	-	+	+	3
Total			20	11	22	23	

* W (Write grain), Br (Brown grain), Bl (Black grain), + (Resistance positive band, - (No or negative band)

Table 2 Gene-specific PCR primers used in the identification of the rice blast resistant genes

<i>R</i> gene	DNA Makers	Sequence primer (5'>>>3')	AT (°C)	ES (bp)	Reference
<i>Pi9</i>	pB8	F: CCCAATCTCCAATGACCCATAAC R: CCGGACTAAGTACTGGCTTCGATA	56	500	Liu et al., 2002
<i>Pi54</i>	<i>Pi54</i> MAS	F: CAATCTCCAAAGTTTTCAGG R: GCTTCAATCACTGCTAGACC	55	R: 261 S: 359	Ramkumar et al., 2011
<i>Pigm(t)</i>	S29747	F: CAGTGAAACGAACGCTATG R: AATAGGAAGGGTTGATGTTG	56	R: 555 S: 461	Deng et al., 2006

<i>R</i> gene	DNA Makers	Sequence primer (5'>>>3')	AT (°C)	ES (bp)	Reference
<i>Pi-ta</i>	YL155/YL87	F: AGCAGGTTATAAGCTAGGCC R: CTACCAACAAGTTCATCAAA	58	1024	Jia et al., 2002

**R* gene (rice blast resistance gene); AT, Annealing temperature; ES, Expected size

Table 3 Distribution of of four blast resistant genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54*, in 37 Thai rice varieties in Thai rice varieties

Rice set	Total	<i>Pi9</i>	<i>Pita</i>	<i>Pigm(t)</i>	<i>Pi54</i>
white-grain landrace rice	18	9 (50.0%)	8 (44.4%)	10 (55.6%)	4 (22.2%)
colored-grain landrace rice	13	5 (38.5%)	3 (23.1%)	7 (53.8%)	13 (100%)
Improved rice	6	6 (100%)	0 (0%)	5 (83.3%)	6 (100%)
Total	37	20 (54.0 %)	11 (29.7 %)	22 (59.4%)	23 (62.1%)

RESULTS AND DISCUSSION

Twenty Thai rice varieties (54.0%) and IRBL22 (the rice line with the *Pi9* resistant allele) showed a positive band of 500 bp (Figure 4). These 20 rice varieties included nine white-grain landrace rice varieties, five colored-grain landrace rice varieties and six improved rice varieties (Table 1, 3). Fourteen PCR samples of the landrace rice varieties that produced the positive DNA band were randomly selected for purification and sequencing. The obtained sequence showed a 100% sequence identity to the *Pi9* reference sequence (accession no. DQ285630.1).

Eleven rice varieties (29.7%), including eight white-grain landrace rice varieties and three colored-grain landrace rice varieties, showed a positive 1,024 bp DNA fragment. All improved rice could not amplify with *Pita*-specific primer (Table 1, 3) (Figure 4). To confirm the presence

of the *Pita* resistant allele, the PCR product of a rice variety HomNanPon was sequenced and compared with the *Pita* reference sequence from NCBI GenBank (accession no. AF207842.1) and the results showed 100% sequence identity.

The *Pigm(t)* gene-specific Indel marker was used to detect the *Pigm(t)* resistant allele. The resistant allele of the *Pigm(t)* showed the 555 bp amplicon and the susceptible allele showed the 461 bp amplicon. Twenty-two rice varieties (59.4%), including 10 white-grain landrace rice varieties and seven colored-grain landrace rice varieties and five improved rice varieties, gave a 555 bp DNA fragment of the resistant allele (Table 1, 3) (Figure 4). The sequence confirmation of the *Pigm(t)* resistant allele from a rice variety Kean Khu showed 100% identity

to the reference sequence from NCBI GenBank (accession no. AF207842).

In the *Pi54* gene-specific Indel marker, the resistant allele of the *Pi54* gene showed the 261 bp amplicon and the susceptible allele showed the 359 bp amplicon. The results showed that twenty-three rice varieties (62.1%), including four white-grain landrace rice varieties, 13 colored-grain landrace rice varieties and six improved rice varieties, carried the *Pi54* resistant allele with PCR product of 261 bp (Table 1, 3) (Figure 7). To confirm the presence of the *Pi54* resistant allele, a PCR product from rice variety Mafi Dam was sequenced and compared with the reference sequence from NCBI GenBank (accession no HE586202.1.) and the results showed 99.78% nucleotide sequence identity and 100% amino acid sequence identity. One base substitution was changed from GTC to GTT, causing silent mutation.

Two white-grain landrace rice varieties, Jao Dæng 2 and Mak Yom contained four examined rice blast resistant genes. Two colored-grain landrace rice varieties, Nieow Dam (skn 3) and Kee Nok contained, all examined rice blast-resistant genes. Five improved rice varieties contained three rice blast-resistant genes.

CONCLUSION

Rice blast disease is one of the most limiting serious factors for rice production worldwide. Landrace rice varieties have been recognized as valuable genetic resources for improving the resistance level of modern rice

cultivars against biotic diseases [14]. The results from this study validated that Thai landrace rice varieties of northeastern Thailand were a source of four major rice blast resistant genes, *Pi9*, *Pita*, *Pigm(t)* and *Pi54*. The distribution of resistant genes ranged from 29.7% to 62.1%. All examined landrace rice varieties contained at least one rice blast resistant gene, with many having more. Our result agreed with previous reports, including Koide et al. [13] that reported that 159 from 226 Thai rice cultivars had at least one rice blast resistant gene, *Pid3*, *Pi54* and *Pigm*. Four cultivars had three resistant genes. Similar results were reported by Kobayashi et al. [14], which screened the rice blast resistant genes in the rice germplasm of Manipur, India and found that wide rice varieties contained 2 - 7 rice blast resistant genes. Chaipanya et al. [15] reported that 84 Korean rice varieties possessed more than three positive bands of the eight-rice blast resistant genes. Similar results were reported by Wattanaporn et al. [16], which screened the resistance gene *Pita*, *Pib* and *Pi2t* were found in 78 Thai landrace rice varieties. *Pita* is present in 29 Thai landrace rice varieties. Similar results were reported by Agrawal et al. [17]; it has been reported that *Pi9* is present in 64 Thai landrace rice varieties and 1 among them was southern landrace Thai rice, 16 varieties from northern, and 47 varieties from north-eastern Thailand regions and *Pigm(t)* is present in 201 Thai landrace rice varieties. In the *Pi54* gene-specific Indel marker, the resistant allele of the *Pi54* gene showed the 261 bp amplicon and the susceptible allele showed the 359 bp amplicon.

The results showed that twenty-three rice varieties. Similar results were reported by Liu et al. [18], *Pi54* MAS showed a PCR product size of 359 bp. Twenty Thai rice varieties (54.0%) and IRBL9-w (the rice line with the *Pi9* resistant allele) showed a positive band of 500 bp. Similar results were reported by Liang et al. [19], reported 203 landrace rice samples were tested for *Pi9* blast resistance gene using the pB8 DNA marker, 64 cultivars were able to be quantified, *Pi9* marker the resulted showed a PCR product size of a 500 bp. These results indicated that the landrace rice germplasm is a valuable source of the rice blast resistant genes for rice breeding programs.

ACKNOWLEDGEMENT

This research project was funded by Major Biology, Department of Science and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science Roi Et Rajabhat University, Roi Et and Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) and Faculty of Science, Kasetsart University.

REFERENCES

1. Ahn SN, Kim YK, Hong HC, Han SS, Kwon SJ, Choi HC, et al. Molecular mapping of a new gene for resistance to rice blast. *Euphytica*. 2000;116:17–22.
2. Dean RA, Talbot NJ, Ebbole DJ, Farman ML, Mitchell TK, Orbach MJ, et al. The genome sequence of the rice blast fungus *Magnaporthe grisea*. *Nature*. 2005;434:980–6.
3. Sharma TR, Rai AK, Gupta SK, Vijayan J, Devanna BN, Ray S. Rice blast management through host-plant resistance: Retrospect and prospects. *Agr Res*. 2011;1(1):37–52.
4. Qu S, Liu G, Zhou B, Bellizzi M, Zeng L, Dai L, et al. The broad spectrum blast resistance gene *Pi9* encodes a nucleotide-binding site leucine-rich repeat protein and is a member of a multigene family in rice. *Genetics*. 2006; 172:1901–14.
5. Bryan GT, Wu KS, Farrall L, Jia YL, Hershey HP, McAdams SA, et al. Single amino acid difference distinguishes resistant and susceptible alleles of the rice blast resistance gene *Pi-ta*. *Plant Cell*. 2000;12:2033–46.
6. Deng Y, Zhu X, Shen Y, He Z. Genetic characterization and fine mapping of the blast resistance locus *Pigm(t)* tightly linked to *Pi2* and *Pi9* in a broad spectrum resistant Chinese variety. *Theor Appl Genet*. 2006;113: 705–13.
7. Doyle JJ, Doyle JL. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*. 1987;19:11–5.
8. Imam J, Alam S, Mandal NP, Variar M, Shukla P. Molecular screening for identification of blast resistance genes in north east and eastern Indian rice germplasm (*Oryza sativa* L.) with PCR based markers. *Euphytica*. 2014; 196(2):199–211.

9. Jia Y, Wang Z, Singh P. Development of dominant rice blast *Pi-ta* resistance gene markers. *Crop Science*. 2002;42:2145–9.
10. Deng Y, Zhu X, Xu J, Chen H, He Z. Map-based cloning and breeding application of a broad-spectrum resistance gene *Pigm* to rice blast. In: Wang, GL and Valent, B (eds). *Advances in Genetics, Genomics and Control of Rice Blast Disease*. Dordrecht: Springer. 2009;161–71.
11. Villa TCC, Maxted N, Scholten M, Ford-Lloyd B. Defining and identifying crop landraces. *Plant Genetic Resources*. 2006;3:373–84.
12. Yadav MK, Aravindan S, Ngangkham U, Raghu S, Prabhukarthikeyan SR. Correction: Blast resistance in Indian rice landraces: Genetic dissection by gene specific markers. *Plos One*. 2019;14(3):e0213566.
13. Koide Y, Kobayashi N, Xu D, Fukuta Y. Resistance genes and selection DNA markers for blast disease in rice (*Oryza sativa* L.). *The Japan Agricultural Research Quarterly*. 2009;43(4):255–80.
14. Kobayashi A, Ebana K, Fukuoka S, Nagamine T. Microsatellite markers revealed the genetic diversity of an Old Japanese Rice Landrace ‘Echizen’. *Genet Resour Crop Ev*. 2006;53(3): 499–506.
15. Chaipanya C, Telebanco-Yanoria MJ, Quime B, Longya A, Korinsak S, Korinsak S, et al. Dissection of broad-spectrum resistance of the Thai rice variety Jao Hom Nin conferred by two resistance genes against rice blast. *Rice*. 2017;10–8.
16. Wattanaporn T, Ing-on S, Kritkittisak P, Sureeporn K-N, Chatchawan J. Gene specific marker screening and disease reaction validation of blast resistant genes, *Pid3*, *Pigm* and *Pi54* in Thai landrace rice germplasm and recommended rice varieties. *Plant Genetic Resources*. 2019;17(5):421–6.
17. Agrawal GK, Pandey RN, Agrawal VP. Isolation of DNA from *Choerospondias asillaris* leaves. *Biotechnology and Biodiversity Letters*. 1999;2:19–24.
18. Liu G, Lu G, Zeng L, Wang GL. Two broad-spectrum blast resistance genes, *Pi9(t)* and *Pi2(t)*, are physically linked on rice chromosome 6. *Mol Genet Genomics*. 2014;267:472–80.
19. Liang ZJ, Wang L, Pan QH. A new recessive gene conferring resistance against rice blast. *Rice*. 2016;9:47–52.



Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 M.1 Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand
Tel (02) 549-4681 Fax. (02) 577-5038, (02) 549-4680
www.ird.rmutt.ac.th

