



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



Research Journal

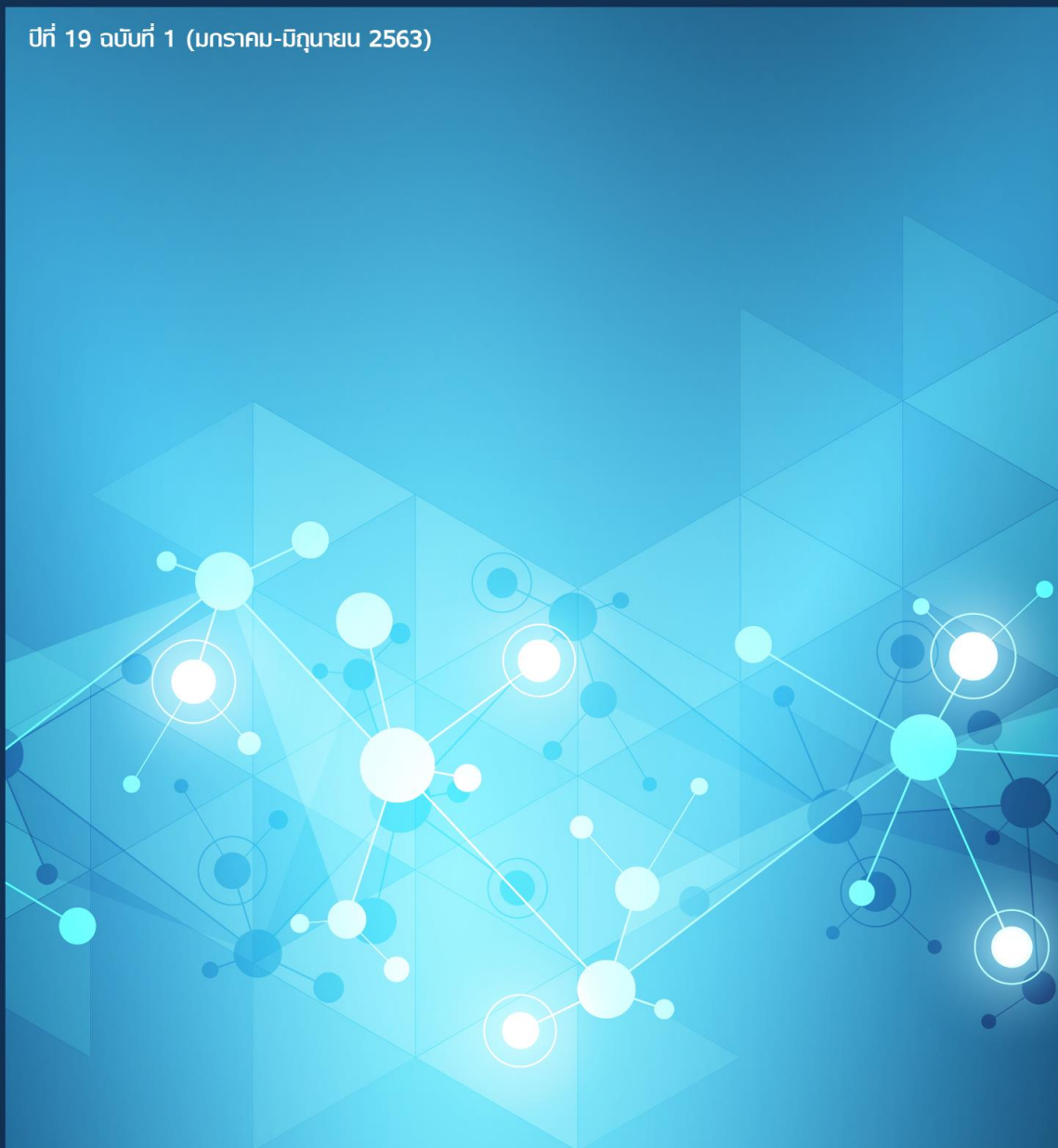
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Volume 19 Issue 1 January-June 2020

ISSN Print: 1686-8420
Online: 2651-2289

ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2563)

RJ-RMUTT
Science and Technology



วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2563

วัตถุประสงค์

วารสารวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (RJ-RMUTT) เป็นวารสารที่เผยแพร่องค์ความรู้ และประสบการณ์ทางด้านวิชาการและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดหมายและวัตถุประสงค์ของวารสารวิจัยดังนี้

1. เพื่อเผยแพร่แนวความคิด งานวิจัย การพัฒนาและประเด็นสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อกระตุ้นให้เกิดการอภิปรายทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขาวิชา ซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์

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

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมหมาย	ผิวสอาด	อธิการบดี
รองศาสตราจารย์ กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	รองอธิการบดี
นายพงศ์พิชญ์	ถ้วนภูษา	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิริแซ	พงษ์สวัสดิ์	ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน
Prof. Sean	Danaher	Northumbria University (UK)
Prof. Hee Young	Lee	Yeungnam University (Korea)
Prof. Seiichi	Kawahara	Nagaoka University of Technology (Japan)

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วารุณี	อริยวิริยะนันท์	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
---------------------------	-----------------	--------------------------------

กองบรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ตริตศ	เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ คมสัน	มาลีสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ สมอง	เอกสิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ เกสัฏกรหญิง พรอนงค์	อร่ามวิทย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ชูกิจ	ลิมปิจำนงค์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
รองศาสตราจารย์ วสกร	บัลลังก์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์ บุญยัง	ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ จตุรงค์	ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สรพงษ์	ภาสุปรีย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อมร	ไชยสัตย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นริศร์	บาลทิพย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0 2549 4681 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	ธรรมวิชากร	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวมนต์ทิชา	รัตนพันธ์	สถาบันวิจัยและพัฒนา

ออกแบบปก

นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวมนต์ทิชา	รัตนพันธ์	สถาบันวิจัยและพัฒนา

จัดทำรูปเล่ม

นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
--------------	---------	---------------------

คำนำ

วารสารวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (RJ-RMUTT) เป็นวารสารที่ส่งเสริมงานด้านวิจัยและดำเนินงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index, TCI Centre) รับผิดชอบบทความวิจัย บทความวิชาการ เปิดรับบทความทั้งเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและวิชาการ รวมถึงแนวคิดในการพัฒนางานวิจัย เพื่อกระตุ้นให้เกิดเป็นแนวทางการอภิปรายทุกสาขาซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐาน และวิจัยประยุกต์ ทั้งภายใน และภายนอกมหาวิทยาลัย

สำหรับวารสารวิจัยปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มิถุนายน 2563) ได้รวบรวมผลงานทางวิชาการจากผลการวิจัยทั้งสิ้น จำนวน 12 บทความ ประกอบด้วยบทความจากผลงานวิจัยจากหลากหลายสาขา ซึ่งได้ผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งภายนอกและภายในมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกบทความจะเป็นประโยชน์และสามารถช่วยพัฒนางานวิจัยแก่ผู้ที่สนใจให้ก้าวหน้าต่อไปได้

กองบรรณาธิการ

สารบัญ

ผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์	1
Effect of Sterilization Process on Physicochemical Properties of Lotus Leaf Wrapped Rice in Retort Pouch Product	
สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพินิจ, เพียงรวี ปาณศรี และ จูติมา ไชยดำ	
การพัฒนาขั้วไฟฟ้าแอโนดทังสเตนออกไซด์ร่วมบิสมาทวานาเตตสำหรับกำจัดสีย้อมด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก	16
WO ₃ /BiVO ₄ Photoanode Electrode Improvement for Photoelectrocatalytic Dye Degradation	
พารุจน์ สุภานันทิน และ ฉัตรชัย พลเชื้อว	
การเตรียมนอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันผ่านกลไกการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์	27
High-Performance Preparation of Polymer Particle by Emulsion Polymerization via Polymerization Induced Self-Assembly Mechanism	
เนตรนภา กำลังมาก, อรรถน เยี่ยมประเสริฐ, ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์, สติติย์ ไพรพฤษ และ อมร ไชยสัตย์	
การใช้อินูลินทดแทนน้ำตาลทรายในไอศกรีมนมเสริมอกไก่	39
The Using of Inulin Replaced with Sugar in Milk Ice Cream Supplemented with Chicken Breast	
จิราภัทร โอทอง, ลัดดาวัลย์ กลิ่นมาลัย และ อมรรัตน์ เจริญชัย	
การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บสารหอมด้วยเทคนิคพิกเคอริงอิมัลชัน	51
Preparation of Polymer Microcapsules Encapsulated Fragrance by Pickering Emulsion Technique	
กัลปิงหา รัตนไทรแก้ว, อมร ไชยสัตย์, จิรศักดิ์ ตรีพรหม และ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์	
ผลของเพคตินจากเปลือกแตงโมต่อคุณภาพของแยมกระเจี๊ยบแดง (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.)	64
Effect of Pectin from Watermelon Rind on Quality of Roselle (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.) Jam	
อินทรา ลิจินทร์พร, นันทชนก นันทะไชย, ปาลิดา ตั้งอนุรัตน์, อัญชลินทร์ สิงห์คำ และ ประดิษฐ์ คำหนองไผ่	
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิดินเพื่อเพาะกล้าไม้เบญจมาศ	74
Development of a Mathematical Model to Predict Soil Temperature for the Growth of Chrysanthemum Sprouts	
จักรวาล บุญหวาน, มานพ แยมแพง, ศิริชัย เทพา, ธนาพล สุขชนะ, พิมพ์พรรณ ปรีองาม, รัตน์ชัย ไพรินทร์ และ มนพร คุปตาสา	

สารบัญ (ต่อ)

การพัฒนาอุปกรณ์อย่างง่ายที่อาศัยการแพร่ของแก๊สกับกระดาษที่ตรึงด้วยรีเอเจนต์ธรรมชาติและการวิเคราะห์ค่าสีจากภาพถ่ายดิจิทัลสำหรับวิเคราะห์แอมโมเนีย	86
Development of Simple Device based on Gas Diffusion with Natural Reagent Immobilized Paper and Digital Image Colorimetry for Ammonia Determination	
นภาพร วรณพรม และ เยวลักษณ์ ชื่นหัวโตน	
Simulation of Shielding Parameters of Some High Entropy Alloys Containing Energies for Gamma Ray and Fast Neutron	97
Kittisak Sriwongsa, Punsak Glumglomchit, Teeratus Wananuraksakul, Arisa Pimprakhon, Taweewat Hanchana and Sunantasak Ravangvong	
ระบบแนะนำส่วนบุคคลโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับชั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และการคัดกรองสิ่งของร่วม	106
Personal Recommender System based on Agglomerative Clustering together with User-based and Item-based Collaborative Filtering Methods	
รัฐวรรณ พันธุนิล และ นิเวศ จิระวิจิตชัย	
การศึกษาและทดสอบเครื่องตัดใบบัวหลวง	113
Study and Testing of Lotus Leaves Cutting Machine	
จตุรงค์ ลังกาพินธุ์, สุนัน ปานสาคร, รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์, เกียรติเกรียงไกร แคมสีม่วง และ เอกชัย บัวคลี่	
การประเมินสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านจุลชีพจากสารสกัดเอทานอลของผลตะขบป่า	124
Evaluation of Phytochemical Screening, Antioxidant and Antimicrobial Activities from Ethanolic Extracts of the <i>Flacourtia Indica</i> (Brum.f.) Merr. Fruits	
พัทวัฒน์ สีขาว, เรณูกา เชื้อบุญมี, ปณิธาน สุระยศ, สาธิต นัตรพันธ์ และ นฤมล เกื่อนกุล	





ผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์

Effect of Sterilization Process on Physicochemical Properties of Lotus Leaf Wrapped Rice in Retort Pouch Product

สุนัน ปานสาคร* จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ เพ็ญงวี ปาณศรี และ ฐิติมา ไชยดำ

Sunan Parnsakhorn*, Jaturong Langkapin, Peangrawee Pansri and Thitima Chaiyadam

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: sunan.p@en.rmUTT.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 9 August, 2019

Revised: 18 September, 2019

Accepted: 30 October, 2019

Available online: 6 April, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmUTT.2020.1

Keywords: wrapped rice, lotus leaf, sterilization, retort pouch

The aim of research is study the effect of sterilization process on physicochemical properties of lotus leaf wrapped rice in retort pouch product that were sterilized at 121 °C for 15, 30 and 45 minutes respectively. The calculating of F value (F_0), moisture content, water activity, color value, color deference, hardness value, sensory evaluation and total viable count were determined. The result showed that the F value (F_0) of retort pouches sterilized at 121 °C for 15, 30 and 45 minutes are 10.9, 19.7 and 42.1 minutes consecutively and total microorganisms were found < 10 CFU/g, which is in the safe criteria for consumption. No significant color value (L^* , a^* , b^*) was found in each lotus leaf wrapped rice in retort pouch product ($p > 0.05$), while the color difference (ΔE^*) was increased from 1.42, 1.84 and 2.48 with product sterilized at 121 °C for 15, 30 and 45 minutes respectively. It was also found that the hardness value of all lotus leaf wrapped rice in retort pouch product were a significant downward trend ($p \leq 0.05$) when increasing the heating time. Including, after heating process the moisture content and water activity

values were presented between 62-66 %wb and 0.87-0.92, respectively. The lotus leaf wrapped rice in retort pouch product were heated with microwave before consumption, indicated that most consumers are more satisfied than not heating.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่อุณหภูมิ 121 °C เวลา 15 30 และ 45 min ตามลำดับ การคำนวณหา F_0 ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี ความแตกต่างสีโดยรวม ความแข็ง ความพึงพอใจของผู้บริโภค และปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 30 และ 45 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 10.9 19.7 และ 42.1 min ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม < 10 CFU/g อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยสำหรับการบริโภค ค่าสี $L^* a^* b^*$ ในแต่ละสภาวะไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในขณะที่ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*) เพิ่มขึ้นจาก 1.42 1.84 และ 2.48 หลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 30 และ 45 min ตามลำดับ ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน รวมไปถึงปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระพบว่าหลังการให้ความร้อนมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นระหว่าง 62-66 %wb และปริมาณน้ำอิสระในช่วง 0.87-0.92 ในการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อนการบริโภคมีความพึงพอใจสูงกว่าการไม่ให้ความร้อน

คำสำคัญ: ข้าวห่อใบบัว ใบบัว การสเตอริไรส์ บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์

บทนำ

ข้าวห่อใบบัว เมนูที่หารับประทานได้ไม่มากนัก เป็นอาหารสูตรโบราณ มีมานานตั้งแต่สมัยราชวงศ์เหลียง ทางตอนใต้ของจีน เป็นการนำข้าวมาผัดกับเครื่องเทศต่าง ๆ และผสมกับส่วนประกอบหลากหลายชนิด เช่น เนื้อหมู กุนเชียง เห็ดหอม กุ้งแห้ง ไข่เค็ม เม็ดบัว จากนั้นนำไปห่อรวมกันในใบบัวแล้วนำไปนึ่งจนได้ออกมาเป็นข้าวอบใบบัวที่มีกลิ่นหอมของใบบัวช่วยเพิ่มความอร่อยอาหาร และมีคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากในข้าวห่อใบบัวมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตให้พลังงานแก่ร่างกาย (1) มีเนื้อสัตว์เป็นแหล่งโปรตีนช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ มีไขมันชนิดที่ไม่อิ่มตัวให้พลังงานและความอบอุ่นแก่ร่างกาย (2) มีเห็ดหอมที่มีสรรพคุณทางยาช่วยป้องกันโรคมะเร็งในเด็ก ถ้ารับประทานเป็นประจำจะช่วยป้องกันการอักเสบของผิวหนัง ช่วยป้องกันการเกิดอาการตับแข็งและหลอดเลือดแข็งตัว มีเส้นใยช่วยทำให้ขับถ่ายได้ง่าย นอกจากนี้ยังช่วยจับสารเคมีที่เป็นพิษ และทำให้ผ่านลำไส้ได้อย่างรวดเร็ว ลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ได้ (3) มีเม็ดบัวมีวิตามินซีสูง โปรตีนสูงและยังมีฟอสฟอรัส เหล็ก แต่ส่วนประกอบหลักจะเป็นคาร์โบไฮเดรตมากถึง 60 % ไม่มีไขมัน จึงช่วยให้ไม่อ้วนและให้พลังงานมาก มีสรรพคุณเด่นช่วยในเรื่องของการบำรุงเลือดสำหรับสตรีที่ประจำเดือนมาไม่ปกติ อีกทั้งยังช่วยขับลม แก้อท้องผูก ท้องเฟ้อ (4, 5) เป็นต้น

ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย ข้าวเป็นธัญพืชสำคัญที่สุดในด้านโภชนาการ ซึ่งคนส่วนใหญ่นิยมบริโภคข้าวในลักษณะข้าวหุงสุกหรือการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนั้นข้าวห่อใบบัวจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง

ของผู้บริโภค ถึงแม้ข้าวห่อใบบัวจะมีคุณค่าทางโภชนาการสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ด้วยขั้นตอนการผลิตที่ค่อนข้างยุ่งยาก ส่วนผสมหลากหลายชนิดจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่หาซื้อได้ค่อนข้างยาก ประกอบกับข้าวห่อใบบัวมีข้อเสียในแง่มีอายุการเก็บรักษาได้ในระยะเวลาสั้น เนื่องจากเกิดการเน่าเสียและอาหารที่เสื่อมคุณภาพ ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร เช่น ปฏิกริยาทางเคมี เป็นปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เอนไซม์ของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปเช่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส การเกิดแก๊ส การไหลเยิ้มของของเหลว และเคมีที่ผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวนิยมนำข้าวเสาให้มาเป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากมีลักษณะการแยกตัวของเมล็ดข้าวค่อนข้างดี เป็นข้าวในกลุ่มอะไมโลสสูง (6) ซึ่งเนื้อสัมผัสค่อนข้างแข็ง อย่างไรก็ตามด้วยคนปัจจุบันหันมาใส่ใจสุขภาพกันมากขึ้นดังนั้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงเป็นข้าวที่ได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นข้าวที่มีกลิ่นหอมเป็นเอกลักษณ์ เมล็ดเรียวยาวสวยงามเมื่อนำมาหุงสุกจะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและให้พลังงานแก่ร่างกายและมีคุณค่าทางโภชนาการ (7) จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์โดยใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพื่อให้สะดวกต่อการบริโภคและสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ให้ยาวนานขึ้น

บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์พบว่าเป็นภาชนะบรรจุที่เข้ามาแทนที่กระป๋อง สามารถปดผนึกสนิท มีความแข็งแรง สามารถทนต่อความร้อนและความดันสูงได้ใช้บรรจุอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อแบบเชิงการค้าได้เหมือนกับกระป๋อง โดยฆ่าเชื้อในหม้อฆ่าเชื้อภายใต้แรงดัน อาหารที่ผ่านการฆ่าเชื้อสามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ อีกทั้งสะดวกต่อการขนย้าย พกพา และพร้อมรับประทาน เพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้บริโภค (8, 9) ทั้งนี้การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนภายใต้สภาวะปลอดเชื้อแบบเชิงการค้าต้องคำนึงถึงตัวแปรหนึ่งที่สำคัญ ได้แก่ ค่า F_0 ซึ่งหมายถึง

เวลาของการฆ่าเชื้อที่เทียบเท่า ณ อุณหภูมิ 121 °C (250 °F) ของกระบวนการฆ่าเชื้อที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 335 พ.ศ. 2556 อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทกำหนดให้ค่า F_0 ที่ใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารที่เป็นกรดต่ำจะต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 3 min เพื่อให้เพียงพอต่อการทำลายสปอร์ของ *Clostridium Botulinum* ซึ่งค่า F_0 ของ ผลิตภัณฑ์จากข้าวหุงสุกมักจะมีค่าอยู่ในช่วง 3-7 min (10)

ในปัจจุบันจะพบผลิตภัณฑ์อาหารบรรจุในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ มีผลิตขึ้นอย่างแพร่หลายและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เช่น สุภาพร และ กฤตภาส (11) ได้พัฒนาบรรจุภัณฑ์น้ำพริกพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ พบว่า เมื่อฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 min สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องได้เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ในปี 2557 มาฤดี และ อธิรินทร์ (12) ศึกษาผลของระยะเวลาและอุณหภูมิฆ่าเชื้อต่อคุณภาพของไส้กรอกพร้อมรับประทานบรรจุรีทอร์ทเพาซ์และรายงานวาระดับการฆ่าเชื้อเชิงการค้า (F_0) ที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อการบริโภคคือ 4.02 min นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อลดอุณหภูมิฆ่าเชื้อ ซึ่งทำให้ระยะเวลาฆ่าเชื่อนานขึ้น ทำให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พุกชา (13) ได้ศึกษาผลของเวลาการให้ความร้อนต่อลักษณะทางกายภาพของปลาทุ้มเค็มในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์พบว่าการฆ่าเชื้อที่ 121 °C เป็นเวลา 30 40 และ 50 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 7.7 8.8 และ 12.1 min ตามลำดับ และตรวจไม่พบค่าจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC) ต่อมา Thakur and Rai (14) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการและการประเมินอายุการเก็บของข้าวผสมเครื่องเทศหุงสุกในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ พบว่า การฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 117.67 °C เป็นเวลา 22.4 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 8.7 min และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีที่สุดและสามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลา 180 วัน จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาดังนี้นักวิจัยนี้จึงมีความประสงค์ที่จะศึกษาผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์

ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับผู้บริโภค ช่วยส่งเสริมให้ผู้บริโภคได้รับสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เป็นการส่งเสริมและรักษาภูมิปัญญาท้องถิ่นให้คงอยู่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมากขึ้น รวมถึงผลิตภัณฑ์ดังกล่าวนี้จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้ประกอบการในการนำไปขยายต่อเชิงพาณิชย์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างข้าวห่อใบบัว

จัดซื้อข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 คุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์ สะอาด จากร้านค้าที่ได้มาตรฐาน ควบคุมความชื้นเริ่มต้นของข้าวที่ 10-12 %wb. บรรจุสถานะสุญญากาศลงละ 1,000 g เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C จนกว่าจะนำไปใช้ในการทดสอบ จากนั้นเตรียมส่วนผสมในการทำข้าวห่อใบบัว ประกอบด้วย น้ำซอสปรุงรส หอมแดงเม็ดบัว กุ้งแห้ง หมู กุนเชียง ไข่เค็ม และข้าวขาวดอกมะลิ 105 หุงสุก

ขั้นตอนการเตรียมข้าวหุงสุกโดยชั่งตัวอย่างข้าวจำนวน 500 g และชั่งน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองแล้วจำนวน 500 g ใส่ลงในหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและทำการเปิดสวิตช์เพื่อทำการหุงสุกจนได้ตัวอย่างข้าวหุงสุกที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และนำใบบัวหลวงมาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 cm หนึ่งให้ความร้อนเป็นเวลา 15 min จากนั้นนำตัวอย่างข้าวหุงสุกที่ได้เตรียมไว้ชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 150 g ผสมกับน้ำซอสปรุงรสคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำส่วนผสมอื่นจัดเรียงในใบบัว แล้วนำข้าวที่คลุกเคล้าใส่ลงในใบบัว ทำการห่อข้าวในใบบัวและหนึ่งให้ความร้อนเป็นเวลา 30 min ขั้นตอนนี้เป็นกรให้ความร้อนเบื้องต้นกับข้าวห่อใบบัวในทุกตัวอย่าง และใช้เป็นตัวอย่างควบคุมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนระดับระดับสเตอริไรส์ จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมทั้งทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อเพื่อหาค่า F_0

นำตัวอย่างข้าวห่อใบบัวที่ได้จากการเตรียมและผ่านการนึ่งที่เวลา 30 min โดยมีน้ำหนักประมาณ 170 g ต่อห่อ หรือที่ขนาดประมาณ 8x10x4 cm (กว้างxยาวxสูง) บรรจุในถุงรีทอร์ทเพาซ์แบบถุงตั้ง (Stand-up pouch) ขนาด 10 x 16 cm (บริษัท ปทุมเพล็กซ์ แพ็คเกจจิง จำกัด) ทำการการไล่อากาศ และปิดผนึกปากถุงด้วยเครื่องปิดผนึกด้วยความร้อน สำหรับตัวอย่างที่จะนำไปใช้หาค่า F_0 ทำการเจาะรูที่ 1/3 ของความสูงจากก้นถุงรีทอร์ทเพาซ์ซึ่งเป็นจุดที่ร้อนซ้ำที่สุดของผลิตภัณฑ์ และเสียบสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type T) ปลายสายวัดอุณหภูมิด้านในถุงเจาะทะลุข้าวห่อใบบัวไปยังตำแหน่งกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์แล้วทำการไล่อากาศและปิดผนึก

ขั้นตอนการฆ่าเชื้อ

นำตัวอย่างข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการเตรียมและเสียบสายวัดอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ววาง ณ ตำแหน่งกลางหม้อฆ่าเชื้อ (รีทอร์ทแรงดันสูงชนิด Water Spray Retort, (National Direct Network Co., Ltd, Thailand)) ในขณะที่ตัวอย่างข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ถุงอื่น ๆ จัดวางในตำแหน่งชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่าง ของหม้อฆ่าเชื้อ จากนั้นนำสายวัดอุณหภูมิต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger, National Instruments Model NI 9211, Hungary) และทำการฆ่าเชื้อที่ 121 °C เป็นเวลา 15 min โดยทำการบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 1 min บันทึกอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และหม้อฆ่าเชื้อตั้งแต่การให้ความร้อน (Heating) การคงอุณหภูมิ (Holding) ตามเวลาที่กำหนด และเมื่อครบเวลา ผลิตภัณฑ์จะถูกลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วด้วยการสเปรย์น้ำ (Cooling) และควบคุมแรงดันภายในรีทอร์ทเพื่อป้องกันการปริหรือแตกของถุงรีทอร์ทเพาซ์ โดยเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ถูกลดลงไปถึงอุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 40 °C จึงจะถูกนำออกจากหม้อฆ่าเชื้อเพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี

ต่อไป ทำการทดสอบใหม่โดยการเปลี่ยนสภาวะการทดสอบเป็นการฆ่าเชื้อที่ 121 °C เป็นเวลา 30 min และ 121 °C เป็นเวลา 45 min ตามลำดับ

คำนวณหาค่า F_0

ทำการคำนวณหาค่า F_0 ของแต่ละช่วงเวลาการฆ่าเชื้อโดยวิธี Patashnik's Method (15) คำนวณหาค่า Lethal Rate ของแต่ละช่วงเวลา ตามสมการที่ (1) และ คำนวณค่า Lethal Rate สะสม (Running Total) เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่า F_0 ตามสมการที่ (2)

$$L = 10^{\left[\frac{(T-250)}{18}\right]} \quad (1)$$

$$F_0 = t\left[\frac{(L_1+L_2)}{2} + \frac{(L_2+L_3)}{2} + \dots + \frac{(L_{n-1}+L_n)}{2}\right] \quad (2)$$

โดยที่ L คือ Lethal rate เวลาเทียบเท่าของ ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ ณ อุณหภูมิใด อุณหภูมิหนึ่งกับอุณหภูมิอ้างอิง (°F)

T คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ (°F)

L_1 คือ Lethal rate ณ เวลาการทดสอบเริ่มต้น

L_n คือ Lethal rate ณ เวลาการทดสอบใด ๆ

t คือ ช่วงเวลาการทดสอบวัดอุณหภูมิ (1 min)

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

1. ปริมาณความชื้น (Moisture Content):

อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน AOAC (16) โดยการ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าว 2 g (น้ำหนักก่อนอบ) อบแห้งด้วย ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven, Model WTB Binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 16 hr จากนั้น นำตัวอย่างพร้อมภาชนะใส่ในโถดูดความชื้นทันทีเป็นเวลา 30 min และชั่งน้ำหนักหลังการอบ คำนวณหาค่า ความชื้นด้วยสมการที่ (3) รายงานผลในหน่วยเปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก (%wb)

เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก (%wb)

$$= \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}) \times 100}{\text{ตัวอย่างก่อนอบ}} \quad (3)$$

2. ปริมาณน้ำอิสระ (a_w): หาปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Model Aqualab Model 3 TE, USA) โดยวิเคราะห์ในส่วน ของ องค์ประกอบที่เป็นข้าว

3. ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Viable Count): อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก Maturin และ Peeler (17)

4. ค่าสี (Color): วัดค่าสีด้วยเครื่อง Color Difference Meter (Model JC801, Tokyo, Japan) โดยวิเคราะห์ในส่วนขององค์ประกอบที่เป็นข้าว โดยที่ค่า L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว สำหรับค่า a^* คือค่าความ เป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นลบและมีค่าความ เป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่ง ก่อนทำการวัดค่าสี เครื่องวัดสีจะถูกปรับเทียบความ เทียงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 98.11 -0.11 และ -0.08 ตามลำดับ

5. การหาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*): นำ ข้อมูลค่า L^* a^* b^* ที่ได้วัดจากเครื่องวัดสีที่แต่ละสภาวะ การทดสอบ (ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อที่ระยะเวลาต่าง ๆ) มาคำนวณหาค่าความแตกต่างสีโดยรวมด้วยสมการที่ (4)

$$\Delta E^* = [(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (4)$$

โดยที่ ΔE^* คือ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม

L_0^*, a_0^*, b_0^* คือ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดงและค่า ความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่าน กระบวนการฆ่าเชื้อ

L^*, a^*, b^* คือ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่า ความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ที่ผ่าน กระบวนการฆ่าเชื้อที่สภาวะต่างๆ

6. ค่าความแข็ง ทดสอบค่าความแข็งของ ผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Instron Universal Tester Machine, Model LRX Plus, UK)

ตามวิธีการกดแบบ Back Extrusion ค่าที่อ่านได้เป็นความแข็งของตัวอย่างในหน่วยของนิวตัน (19)

7. การทดสอบระดับความพึงพอใจของผู้บริโภค (Sensory Evaluation): ทดสอบความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวผู้บริโภคนจำนวน 30 คน โดยวิธี Hedonic Scaling 9 point ซึ่งมี 9 คะแนน ได้แก่ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากอย่างยิ่ง 2 หมายถึง ไม่ชอบมาก 3 หมายถึง ไม่ชอบปานกลาง 4 หมายถึง ไม่ชอบเล็กน้อย 5 หมายถึง เฉย ๆ 6 หมายถึง ชอบเล็กน้อย 7 หมายถึง ชอบปานกลาง 8 หมายถึง ชอบมาก และ 9 หมายถึง ชอบมากอย่างยิ่ง (20) โดยทำการประเมินทางประสาทสัมผัสในด้าน สี กลิ่น รส การแยกตัวของเมล็ด ความแข็ง ความเหนียว ลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวม

การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Analysis of Variance (ANOVA)) ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95 % และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

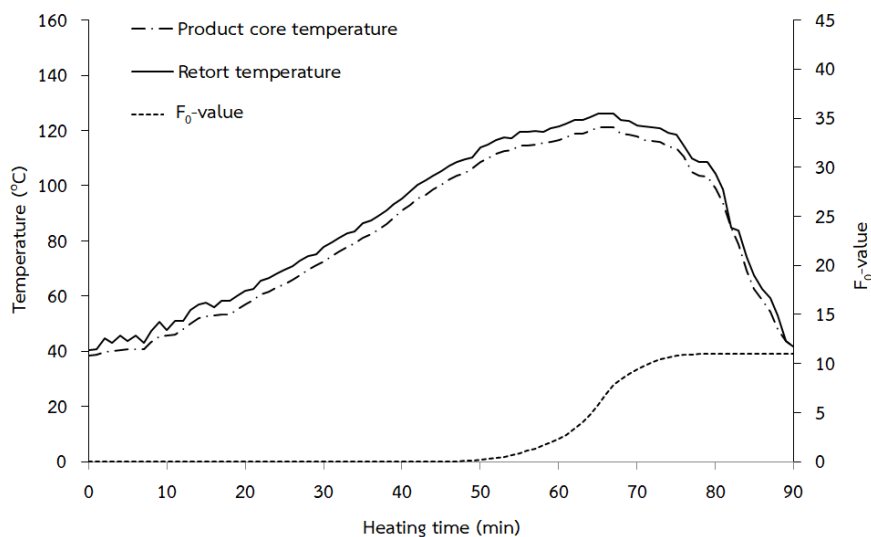
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ โดยแปรระยะเวลาในการฆ่าเชื้อ 3 ระดับ ได้แก่ 121 °C เป็นเวลา 15 min 30 min และ 45 min ตามลำดับ ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม ค่าความแข็ง การทดสอบระดับความพึงพอใจของผู้บริโภค และปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม พร้อมทั้งคำนวณหา F_0 ของกระบวนการให้ความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1-6 และตารางที่ 1-3

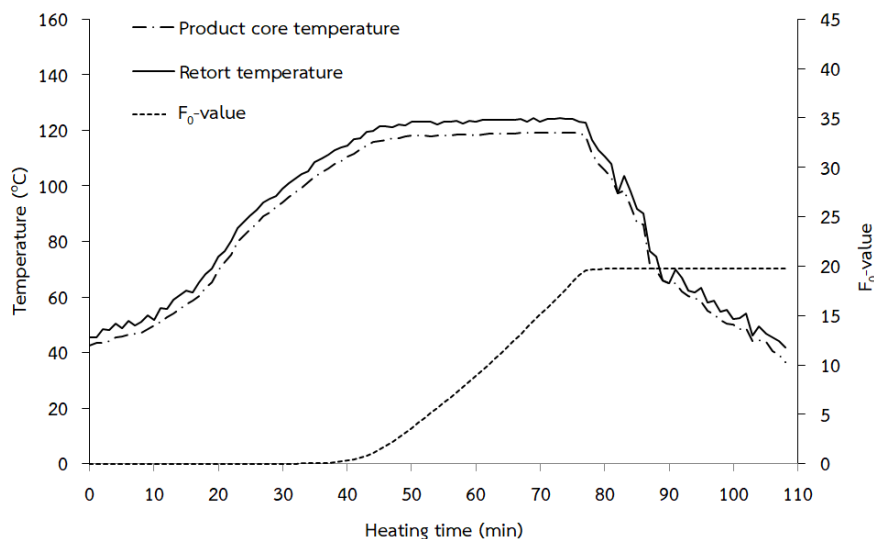
ผลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการคำนวณหา F_0 ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์

จากการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 30 และ 45 min ตามลำดับ พบว่า จากรูปที่ 1-3 แสดงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 121 °C ใช้เวลา 60 45 และ 50 min ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการพบว่า ใช้เวลาทั้งสิ้น 90 110 และ 130 min ตามลำดับ การทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์แตกต่างจากอุณหภูมิภายในหม้อฆ่าเชื้อประมาณ 5-6 °C จากการคำนวณหา F_0 ด้วยวิธีการของ วิธี Patashnik's Method (15) แสดงดังรูปที่ 1-3 พบว่าที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 121 °C เป็นเวลา 15 30 และ 45 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 10.9 19.7 และ 42.1 min ตามลำดับ ทั้งนี้เวลาที่ได้จากการคำนวณหา F_0 เป็นเวลาเทียบเท่าของประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ ณ อุณหภูมิอ้างอิง คือ 121 °C (250 °F) ของทั้งกระบวนการตั้งแต่การเพิ่มอุณหภูมิ การคงอุณหภูมิ และการลดอุณหภูมิ ดังนั้นจากรูปที่ 1-3 พบว่า เวลาของกระบวนการทดสอบไม่เท่ากันจึงส่งผลต่อค่า F_0 ที่แตกต่างกัน โดยค่า F_0 ที่ได้จากการทดสอบเป็นไปตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้อาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิทและมีความเป็นกรดต่ำต้องผ่านการฆ่าเชื้อที่ F_0 ไม่ต่ำกว่า 3 min (21) จากการทดสอบหา F_0 ของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลด้านการประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยสำหรับการบริโภคดังที่ได้รายงานในหัวข้อต่อไป เมื่อพิจารณา F_0 ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น มาถุติ และ อีรินทร์ (12) รายงานว่าระดับการฆ่าเชื้อเชิงการค้าค่า F_0 ของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกพร้อมบริโภคบรรจุรีทอร์ทเพาซ์ที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อการบริโภคคือ 4.02 min พุกษา (13) พบว่า การฆ่าเชื้อปลาหมึกต้มเค็มในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ 121 °C เป็นเวลา 30 40 และ 50 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 7.7 8.8 และ 12.1 min ตามลำดับ Thakur and Rai (14)

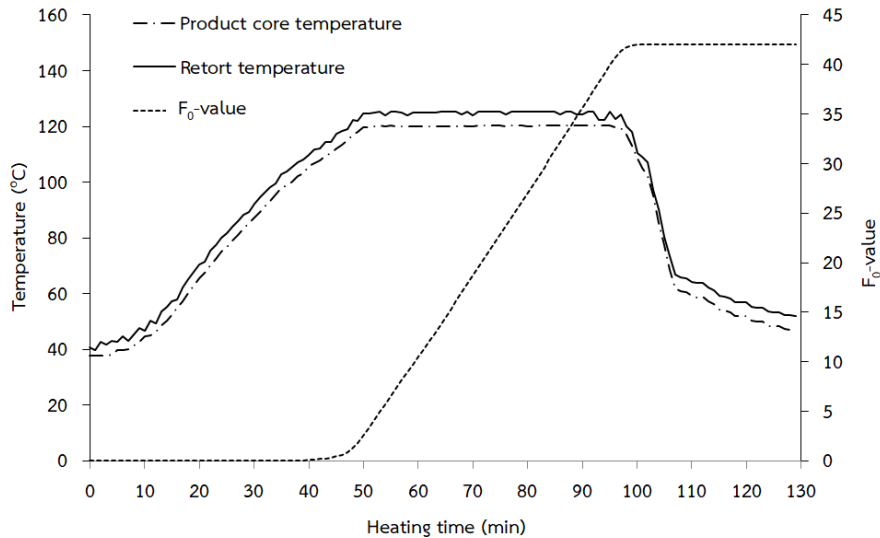
ได้ศึกษาข้าวผสมเครื่องเทศหุงสุกในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ การฆ่าเชื้อที่ปลอดภัยต่อการบริโภคผลิตภัณฑ์ไก่พริกไทย พบว่า การฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 117.67 °C เป็นเวลา 22.4 min ในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ คือ 7.2 min เป็นต้น ให้ค่า F_0 8.7 min และ Nalini et al., (22) รายงานระดับ



รูปที่ 1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่า F_0 ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ระหว่างการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เวลา 15 min



รูปที่ 2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่า F_0 ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ระหว่างการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เวลา 30 min



รูปที่ 3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่า F_0 ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ระหว่างการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เวลา 45 min

ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์

ค่าสีนับเป็นปัจจัยหนึ่งของการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในกระบวนการผลิตข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์จึงคำนึงถึงปัจจัยนี้เป็นอันดับแรกๆ โดยงานวิจัยทำการวัดค่าสีจากข้าวในผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 30 และ 45 min ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของข้าวห่อใบบัวทุกสภาวะการทดสอบ LLW-control LLW-(121-15) LLW-(121-30) และ LLW-(121-45) อยู่ในช่วง 34.15-35.52 ซึ่งอยู่ในกลุ่มสีค่อนข้างคล้ำ และ ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ที่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ทุกสภาวะการทดสอบและให้ค่าอยู่ในช่วง 21.02-22.89 อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากตัวอย่างข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (LLW-control) และเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนเป็น 15 30 และ 45 min ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อ

พิจารณาค่าสีแบบแยกทีละค่าทั้งค่า L^* a^* b^* ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเนื่องจากข้าวที่นำมาผลิตผลิตภัณฑ์มีการผสมคลุกเคล้ากับน้ำซอสปรุงรสที่มีสีค่อนข้างคล้ำ ดังนั้นเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยเวลาที่แตกต่างกันจึงไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงค่าสีอย่างชัดเจน แต่จากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*) ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ พบว่า การเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนจาก 15 min (LLW-(121-15)) เป็น 30 min (LLW-(121-30)) และ 45 min (LLW-(121-45)) ให้ค่า ΔE^* เพิ่มขึ้นจาก 1.42 1.84 และ 2.48 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (LLW-control) นั้นหมายความว่า การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์นานขึ้นส่งผลให้ค่าสีโดยรวมในทิศทางที่สีมีความคล้ำมากขึ้น อาจเนื่องมาจากในน้ำซอสมีส่วนผสมของน้ำตาล เมื่อได้รับความร้อนในเวลานานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล สีจึงมีความเข้มมากขึ้น สอดคล้องกับ Bindu et al. (23) และ พุกษา (13) ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความแตกต่างสีโดยรวมของผลิตภัณฑ์เนื้อหอยและปลาทุ้มเค็มพร้อมรับประทานในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการฆ่าเชื้อ Majumdar

et al., (24) พบว่า ค่า L^* b^* และ a^* ของผลิตภัณฑ์แกง ปรุงสุกจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขององค์ประกอบ ปรุงในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า F_0 ของอาหารระหว่างน้ำตาลและกรดอะมิโน มักเกิดใน เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งเป็น ขณะที่อาหารผ่านความร้อน (25)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อนและหลังการฆ่า เชื้อระดับสเตอริไรส์

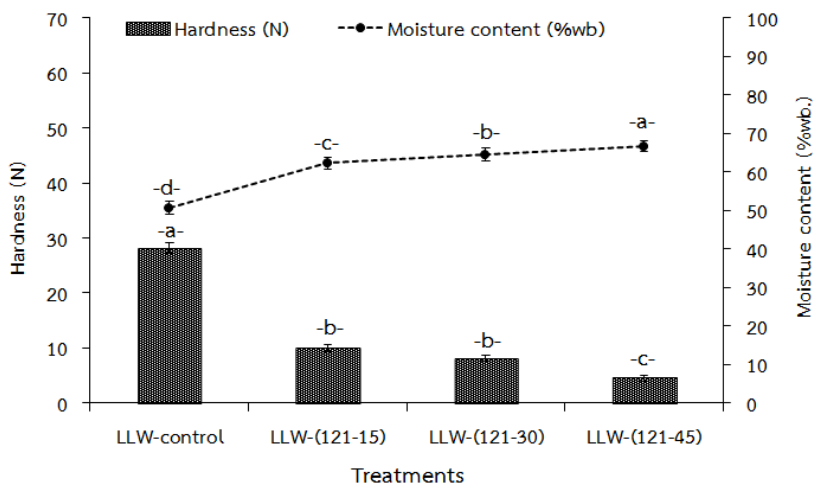
Parameters	Process treatment*			
	LLW-control	LLW-(121-15)	LLW-(121-30)	LLW-(121-45)
L^*	35.38±1.80 ^a	35.52±0.99 ^a	33.64±1.33 ^a	34.15±0.13 ^a
a^*	9.12±0.55 ^b	10.11±0.84 ^a	9.72±0.21 ^{ab}	10.17±0.15 ^a
b^*	21.02±1.89 ^a	22.02±1.79 ^a	21.12±0.98 ^a	22.89±0.87 ^a
ΔE^*	-	1.42	1.84	2.48

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean ± SD) โดยกำหนดให้ LLW-control คือ ข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ; LLW-(121-15) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 min ; LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min ; LLW-(121-45) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 45 min

จากการทดสอบความแข็งหรือลักษณะเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อน และหลังการฆ่าเชื้อแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งค่าความแข็งมี แนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลัง ผ่านการให้ความร้อนโดยพบว่า ข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการ ให้ความร้อน (LLW-control) ให้ค่าความแข็งเท่ากับ 28.18 N และลดลงเท่ากับ 9.93 N และ 8.12 N สำหรับ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความ ร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 min (LLW-(121-15)) และ 30 min (LLW-(121-30)) ตามลำดับ ทั้งนี้ทั้ง 2 สภาวะนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จากนั้นเพิ่มเวลาในการฆ่าเชื้อนานขึ้นเป็น 45 min ที่อุณหภูมิเดิม (LLW-(121-45)) พบว่าค่าความ แข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เท่ากับ 4.55 N เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับปริมาณความชื้น พบว่าเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามแสดงดังรูปที่ 4 โดย ความชื้นของข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์มี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่ 50 %wb. สำหรับข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน และความชื้นในช่วง 62-66 %wb. สำหรับข้าวห่อใบบัวใน บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15-45 min ทั้งนี้ด้วยเวลาที่นานขึ้นใน การให้ความร้อนอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง และส่งผลให้ เม็ดแป้งเกิดการ เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพกระบวนการที่เรียกว่า เจลาติไนซ์เซชัน เมื่อเพิ่มความร้อนสูงขึ้นจนความหนืด เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียกเม็ดแป้งเกิดการพองตัวจนถึง จุดสูงสุดและเกิดความหนืดสูงที่สุดเม็ดแป้งก็จะแตกออก ซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ และความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ เนื้อสัมผัสมีลักษณะนุ่มขึ้นหรือค่าความแข็งลดลง ผลการ ทดสอบสอดคล้องกับ Leelayuthsoontorn and Thipayarat (26) และ โสริยา และคณะ (27) ที่รายงานว่า เวลาและอุณหภูมิที่ให้กับข้าวระหว่างการหุงส่งผลต่อ ลักษณะเนื้อสัมผัส และปริมาณความชื้นหลังการหุง



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความชื้นของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไรส์

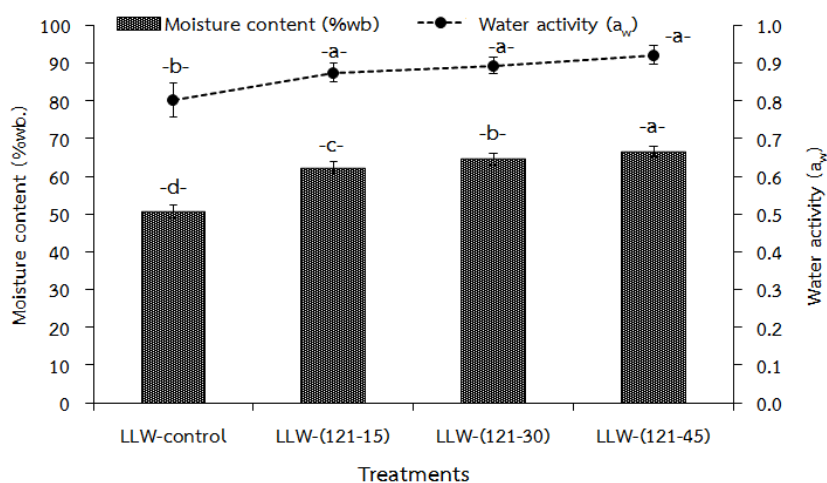
^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean $\pm$ SD)

โดยกำหนดให้ LLW-control คือ ข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน; LLW-(121-15) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 min; LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min; LLW-(121-45) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 45 min

ความชื้นและปริมาณน้ำอิสระมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหารโดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ทำให้อาหารเสื่อมเสีย อีกทั้งความชื้นและปริมาณน้ำอิสระมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีความสอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไรส์ ในส่วนกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัว พบว่า ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อคุณภาพการหุงสุกของข้าว และส่งผลไปยังการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากหากความชื้นต่ำจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวค่อนข้างแข็งและในทางตรงกันข้ามหากความชื้นสูงมากเกินไปจะทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวและไม่น่ารับประทาน ปริมาณน้ำอิสระบอกถึงปริมาณน้ำ

ในอาหาร ซึ่งส่งผลให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย ทั้งนี้ น้ำที่มีอยู่ในอาหารแต่ละชนิดมีการยึดติดอยู่ในโครงสร้างหรือโมเลกุลของสารอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารในรูปแบบ และความแข็งแรงต่างกัน รวมถึงปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่อการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญได้ดีในอาหารที่มีความชื้นสูง อย่างไรก็ตามจากประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 355) พ.ศ.2556 กล่าวว่าค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity) ของอาหารชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทจะมีค่ามากกว่า 0.85 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่า ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (LLW-control) มีค่าเท่ากับ 0.80 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในช่วง 0.87-0.92 สำหรับข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15-45 min สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภาพร และ กฤตภาส (11) ศึกษาพัฒนา

บรรจุภัณฑ์น้ำพริกสวรรค์หอยนางรมและน้ำพริก ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ระหว่าง 0.88-0.89 และ ตะลิงปลิงพร้อมบริโภคนาในภาชนะบรรจุปิดสนิทพบว่าให้ 0.84-0.86 ตามลำดับ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไรส์

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะการทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean $\pm$ SD)

โดยกำหนดให้ LLW-control คือ ข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ; LLW-(121-15) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 min ; LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 min ; LLW-(121-45) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 45 min

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไรส์

*ตัวอย่าง	ปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม (CFU/g)
LLW-control	10
LLW-(121-15)	<10
LLW-(121-30)	<10
LLW-(121-45)	<10

*โดยกำหนดให้ LLW-control คือ ข้าวห่อใบบัวที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ; LLW-(121-15) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 15 min ; LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min ; LLW-(121-45) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 45 min

การผลิตอาหารเพื่อการบริโภค สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึง คือ ความปลอดภัยของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องทำการทดสอบปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ซึ่งให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 ผลการประเมิน พบว่าปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมในผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวใน

บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อนการฆ่าเชื้อให้ค่าเท่ากับ 10 CFU/g และลดลง < 10 CFU/g หลังการให้ความร้อนระดับระดับสเตอริไลส์ในทุกสภาวะการทดสอบ ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์โดยรวมลดลงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัย อ้างอิงได้จากมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 746/2548 กำหนด

มาตรฐานของข้าวหลามบรรจุในภาชนะปิดสนิท ให้มีการปนเปื้อน ของจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^4 โคโลนี/ตัวอย่าง 1 กรัม และประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 355) พ.ศ.2556 กำหนดจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ไม่เกิน 1×10^4 โคโลนี/ตัวอย่าง 1 กรัม ในอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อน (LLW-(121-30)) และหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (LLW-(121-30)-Heat)

Treatment	Color value			Water activity (a_w)	Hardness (N)
	L*	a*	b*		
LLW-(121-30)	33.64±1.33	9.73±0.21	21.12±0.98	0.89±0.01	8.12±0.36
LLW-(121-30)-Heat	31.26±1.25	9.83±0.43	19.69±1.01	0.91±0.01	6.39±0.41

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

โดยกำหนดให้ LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min; LLW-(121-30)-Heat คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min และให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค

ระดับความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวที่ผ่านและไม่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค

จากขั้นตอนการฆ่าเชื้อทั้ง 3 สภาวะการทดสอบพบว่าตัวอย่าง LLW-(121-30) ถึงแม้ว่าจะให้ค่า F_0 ที่มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานอาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิทและมีความเป็นกรดต่ำ แต่เมื่อนำมาพิจารณาในด้านผลการทดสอบทางกายภาพและการสังเกตโดยเฉพาะค่าความแข็ง และความชื้น พบว่าให้คุณลักษณะที่ดีของเมล็ดข้าวแยกเป็นเมล็ดไม่แฉะ รวมถึงส่วนประกอบอื่นๆ ของข้าวห่อใบบัวสมบูรณ์ไม่นิ่มและแข็งจนเกินไป เมื่อทดสอบทางจุลินทรีย์พบว่าปลอดภัยสำหรับการบริโภค ดังนั้นจึงได้นำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

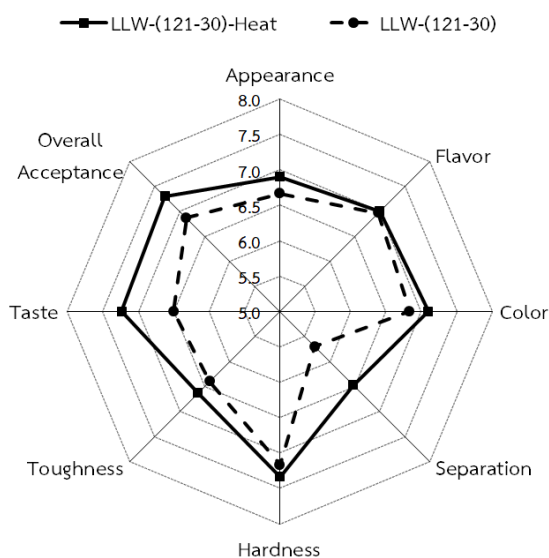
ในการบริโภคผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์สามารถบริโภคได้ทั้งในรูปแบบการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค (LLW-(121-30)-Heat) และไม่ผ่านการให้ความร้อน (LLW-(121-30)) หรือกล่าวได้ว่าฉีกถุงแล้วรับประทานทันที อย่างไรก็ตาม

เมื่อพิจารณาผลการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้บริโภคกับทั้ง 2 สภาวะที่กล่าวมาพบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับผลิตภัณฑ์ก่อนการบริโภคเป็นที่พึงพอใจของผู้บริโภคมากกว่าแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะได้นำรายละเอียดต่อไป ทั้งนี้เมื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าค่า L^* a^* b^* และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของทั้ง 2 สภาวะมีค่าใกล้เคียงกันในขณะที่ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงจาก 8.12 N เป็น 6.39 N หรือผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวมีลักษณะนุ่มขึ้นและสอดคล้องกับระดับคะแนนความพึงพอใจของผู้บริโภคที่นิยมข้าวห่อใบบัวที่มีความนุ่มมากกว่า

ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ คือ การทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้บริโภค ของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min (LLW-(121-30)) กับข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min

และให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภคน (LLW-(121-30)-Heat) โดยพิจารณาจากความพึงพอใจของผู้บริโภคจำนวน 30 คน ที่ระดับคะแนนสูงสุด 9 คะแนนในด้าน สี กลิ่น รส การแยกตัวของเมล็ด ความแข็ง ความเหนียว ลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวม ให้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ก่อน

การบริโภค ให้ค่าระดับความพึงพอใจในด้านในด้าน สี กลิ่น รส การแยกตัวของเมล็ด ความแข็ง ความเหนียว ลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวม เท่ากับ 7.10 7.06 7.23 6.47 7.33 6.63 6.90 และ 7.30 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนก่อนการบริโภคที่ให้ค่าเท่ากับ 6.83 6.97 6.50 5.70 7.17 6.40 6.67 และ 6.87 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ระดับความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์

โดยกำหนดให้ LLW-(121-30) คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min; LLW-(121-30)-Heat คือ ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 min และให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค

สรุปผล

การศึกษาผลของการให้ความร้อนระดับสเตอริไรส์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ด้วยอุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะดวกต่อการบริโภคและสามารถยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้นนั้น โดยทำการศึกษาการให้ความร้อน 3 ระดับ ได้แก่ 121 °C เป็นเวลา 15 min 30 min และ 45 min ให้ค่า F_0 เท่ากับ 10.9 19.7 และ 42.1 min ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้ง 3 สภาวะอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยสำหรับการ

บริโภคหรือปริมาณจุลินทรีย์โดยรวม < 10 CFU/g ประกอบกับเมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการฆ่าเชื้อเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวห่อใบบัวในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์มีแนวโน้มลดลงหลังผ่านการให้ความร้อนด้วยเวลาที่นานขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระพบว่า เป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม ในด้านความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ผู้

ทดสอบให้ค่าความพึงพอใจในระดับชอบมากโดยเฉพาะ
การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อนการบริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชา
วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุน
สถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อุดหนุนทุนวิจัยประเภท
งบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัยฯ ประจำปี
งบประมาณ 2562

เอกสารอ้างอิง

1. ชยกร พาลสิงห์, ดวงไกร ทวีสุข. แหล่งพลังงานและ
การออกกำลังกาย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. พ.ศ.-ม.ย.
2556;31(3):316-22.
2. อัญชลี ศรีจำเริญ. อาหารและโภชนาการ: การ
ป้องกันและบำบัดโรค. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย; 2556.
3. เนตรนภิส ธนนิเวศน์กุล. อาหารและโภชนาการ
(หัตถ์คุณค่าทางอาหาร). นิตยสารหมอชาวบ้าน. ก.ค.
2549;เล่มที่:327.
4. Bhat R, Sridhar KR. Nutritional quality
evaluation of electron beam-irradiated lotus
(*Nelumbo nucifera*) seeds. Food Chem.
2008;107(1):174-84.
5. นิรนาม.สรรพคุณทางยา ของเม็ดบัว [อินเทอร์เน็ต].
2560 [สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มิ.ย. 2562]. จาก:
<https://www.honestdocs.co/medicinal-properties-of-lotus-seeds>
6. อรอนงค์ นัยวิกุล. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2547.
7. วิกีพีเดีย . ข้าวหอมมะลิ [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่
2 ม.ค. 2562]. จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/ข้าวหอมมะลิ>
8. Jun S, Cox LJ, Huang A. Using the flexible
retort pouch to add value to agricultural
products. Honolulu (HI): University of Hawaii.
6 p. (Food Safety and Technology; FST-18);
2006.
9. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์. วัสดุที่
ใช้ทำผลิตภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้น
เมื่อวันที่ 14 มิ.ย. 2562]. จาก:<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0473/r-retort-pouch-รีทอร์ทเพาซ์>
10. วรณดี มหรรณพกุล, ปฎิญา จิยพงศ์,
ศุภศักดิ์ วงษ์สง่า. เทคโนโลยีการผลิตข้าวสำเร็จรูป
ในถุงรีทอร์ท. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.
2552;181:36-43.
11. สุภาพร อภิรัตนานุสรณ์, กฤตภาส จินาภาค. การ
พัฒนาบรรจุภัณฑ์น้ำพริกพร้อมบริโภค
[Development of Packages for Ready-to-Eat
Chili Paste Products]. วารสารวิจัยและพัฒนา
มจร. ต.ค.-ธ.ค. 2556;36(4):451-64.
12. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์, อธิษฐ์ ฉายศิริโชติ. ผลของ
ระยะเวลาและอุณหภูมิฆ่าเชื้อต่อคุณภาพของไส้
พร้อมรับประทานบรรจุรีทอร์ทเพาซ์. รายงานการ
วิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. คณะวิศวกรรมศาสตร์.
2557.
13. พกษา สวาทสุข. ผลของเวลาการให้ความร้อนต่อ
ลักษณะทางกายภาพของปลาทุ้มเค็มใน
บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ [Effect of heating time
on physical properties of Thai style stewed
mackerel in salty soup packed in retort

- pouch]. วารสารแก่นเกษตร.มี.ค.-เม.ย. 2559;44(2):257-64.
14. Thakur RS, Rai DC. Development and optimization of shelf stable ready to eat palak paneer. International Journal of Chemical Studies. 2018;6(1):1670-80.
 15. Shri KS, Steven JM, Syed SH, Rizvi. Food process engineering: theory and laboratory experiments. John Wiley & Sons, US; 2000.
 16. AOAC. Official Methods of AOAC International. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia; 2000.
 17. Maturin L, Peeler JT. Chapter 3 Aerobic Plate Count: Food and Drug Administration (FDA), Bacteriological Analytical Manual Online. 8th ed. Silver Spring, Berlin; 2001.
 18. Mokrzycki WS, Tatol M. Colour difference ΔE - A survey. Faculty of Mathematics and Informatics University of Warmia and Mazury. Poland; 2012.
 19. Reyes VG, Jindal VK. A small sample back extrusion test for measuring texture of cooked rice. J Food Quality. 1989;13(2): 109-18.
 20. กาญจนามหัทธนาทวี, คุลีกา จันทรศรี, ดวงตา สว่างภพ. ข้าวกล้องผสมหุงสุกไว [Quick-Cooking Mixed Brown Rice]. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2555; 8(1):35-46.
 21. อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท. ใน:; บรรณาธิการ. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 355) พ.ศ. 2556. กรุงเทพฯ ฯ: กระทรวงสาธารณสุข; น. 88-92.
 22. Nalini P, Robinson JJ, Abraham V, Appa RR, Narendra BT, Nobal Rajkumar R, Rajkumar, Kathiravan RS. Shelf-Life of Ready-To-Eat Retort Processed Pepper Chicken. Int J Curr Microbiol Appl Sci. 2018;7(3):832-40.
 23. Bindu J, Ravishankar CN, Gopal TKS. Shelf-life evaluation of ready-to-eat black clam (*Villorita cyprinoides*) product in indigenous retort pouch. J Food Eng. 2007;78(3):995-1000.
 24. Majumdar RK, Roy D. Sensory characteristics of retort-processed freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in curry medium. Int J Food Prop. 2017;20(11):2487-98.
 25. วิไล รังสาดทอง. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน จำกัด; 2557.
 26. Leelayuthsoontorn P, Thipayarat A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. Food Chem. 2006;96(4):606-13.
 27. โสรยา เกิดพิบูลย์, ดาริกา เจริญดี, เนศรา จันตะวงศ์, พันชกร อัสวจิต. ผลของวิธีการหุงที่มีต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกายภาพของข้าวฮางในระหว่างการหุง [Effect of Cooking Methods on Morphological and Physical Properties of Hang Rice during Cooking]. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. พ.ศ.-ส.ศ.2555;43(2)พิเศษ:41-4.



การพัฒนาขั้วไฟฟ้าแอโนดทั้งส텐ออกไซด์ร่วมบิสมีทวานาเดตสำหรับกำจัด
สีย้อมด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก

WO₃/BiVO₄ Photoanode Electrode Improvement for Photoelectrocatalytic Dye Degradation

ฟารุจน์ สุภนันติน¹ และ ฉัตรชัย พลเชื้อว^{1, 2*}

Farut Supanantin¹ and Chatchai Ponchio^{1, 2*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้าน “เคมีวัสดุขั้นสูง” คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathumtani 12110, THAILAND

²Advanced Materials Design and Development (AMDD) Research Unit, Faculty of Science and
Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani
12110, THAILAND

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	Photoelectrocatalytic techniques have been developed for the
Received: 2 March, 2020	removal of widely contaminated organic substances in the environment,
Revised: 19 March, 2020	especially the development of semiconductor film preparation on the
Accepted: 23 March, 2020	electrode substrate. The main objective of this research is to develop the
Available online: 6 April, 2020	preparation of WO ₃ /BiVO ₄ thin film on conductive glass (ITO) for application
DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.2	in photoelectrocatalytic cells to remove organic dyes. WO ₃ film fabrication
Keywords:	on the ITO substrate was developed using an electrodeposition technique
photoelectrocatalytic, WO ₃ ,	and then calcined at 500 °C for 30 min. The second BiVO ₄ film layer was
BiVO ₄ , electrodeposition	immobilized on the ITO/WO ₃ surface using a dip coating method and
method, dye degradation	calcination continued at 550 °C for 1 h. The optical properties and
	electrochemical resistance of the fabricated ITO/WO ₃ /BiVO ₄ electrode were

examined for use in oxidation of water solutions. The $\text{ITO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ electrode was applied to the removal of organic dye under photocatalytic, electrocatalytic, and photoelectrocatalytic mechanisms. We succeeded in preparing the $\text{ITO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ and understanding its characteristics and photoelectrocatalytic activities. We can confirm the absorption properties in the visible light, and the bandgap energy value of WO_3 and BiVO_4 of 2.8 and 2.4 eV, respectively. We found that immobilizing BiVO_4 on the WO_3 layer significantly increased the efficiency of the electron transfer rate at the interfacial electrode/electrolyte surface. Importantly, it can confirm the effectiveness of the removal of organic dyes in aqueous solutions under the PEC mechanism, which was 4 and 10 times higher than that of electrocatalytic and photocatalytic mechanism, respectively. This research can be further developed for use in a wastewater treatment system in the dye industry and in industries that produce other organic contaminants.

บทคัดย่อ

เทคนิคโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้รับการพัฒนาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการพัฒนาการเตรียมฟิล์มสารกึ่งตัวนำบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ บนผิวหน้ากระจกนำไฟฟ้า (ITO) เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์โพโตอิเล็กโตรคะตะไลติกสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม ได้พัฒนาการเตรียมฟิล์ม WO_3 ลงบนตัวรองรับ ITO ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ทำการตรึงฟิล์มบางชั้นที่สองของ BiVO_4 ลงบนผิวหน้า ITO/WO_3 ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้นำขั้วไฟฟ้า $\text{ITO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงแสง สมบัติความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำ และประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โฟโตคะตะไลติก อิเล็กโตรคะตะไลติก และโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก เราประสบความสำเร็จ

ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า $\text{ITO}/\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ และเข้าใจคุณลักษณะต่าง ๆ และสมบัติโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติกของขั้วไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เราสามารถยืนยันสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นและค่าพลังงานแถบของ WO_3 และ BiVO_4 เท่ากับ 2.8 และ 2.4 eV ตามลำดับ เราพบว่า การตรึง BiVO_4 ลงบนชั้น WO_3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้นอย่างชัดเจน ที่สำคัญสามารถยืนยันประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมในสารละลายน้ำภายใต้กลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาแบบโพโตอิเล็กโตรคะตะไลติกได้เป็นอย่างดี ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมมากกว่ากลไกอิเล็กโตรคะตะไลติก และโฟโตคะตะไลติก ถึง 4 และ 10 เท่าตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมประเภทสีย้อมและอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์อื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: โพโตอิเล็กโตรคะตะไลติก ทั้งสเดนออกไซด์ บิสมัทวานาเดต การตรึงด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า การกำจัดสีย้อม

บทนำ

เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) เป็นเทคนิคที่มีการตรึงสารกึ่งตัวนำที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและทำงานภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมี ประสิทธิภาพสูง มีกระบวนการที่สะดวก รวดเร็ว และมี ค่าใช้จ่ายต่ำ (1-4) โดยการพัฒนาเทคนิคดังกล่าวมี หลักการคือการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมและการ พัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำบนผิวตัวรองรับ (5-7) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นิยมเลือกมาพัฒนาหรือศึกษามี หลายชนิดได้แก่ TiO_2 (8-10) Fe_2O_3 (11-13) Cu_2O (14-16) BiVO_4 (17-19) และ WO_3 (20-22) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ BiVO_4 ที่มีคุณสมบัติที่ น่าสนใจมากที่สุดในการพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เป็น ขั้วไฟฟ้าแอโนดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน สารละลายน้ำ เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แถบวาเลนซ์ไป ทางบวกมาก และมีช่วงแถบพลังงานที่แคบ ทำให้สารกึ่ง ตัวนำดังกล่าวมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงตา มองเห็นได้เป็นอย่างดี โดยได้พัฒนาการเตรียมฟิล์มบาง โดยใช้สารกึ่งตัวนำผสมสองชั้น (Heterojunction) เพื่อ เพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านประจุที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (23-26) และอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนา เทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลติกคือการพัฒนา กระบวนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลงบนตัว รองรับ วิธีการทั่วไปที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง WO_3 และ BiVO_4 ได้แก่ วิธีหมุนเคลือบ (Spin Coating) (27, 28) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) (29, 30) และ เทคนิค สเปรย์ (Spray Coating) (31) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการ ดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดสเกลและ กระบวนการยังมีความยุ่งยาก ซึ่งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrodeposition) (22, 32-34) และเทคนิคการจุ่ม

เคลือบ (Dip Coating) (35-37) เป็นเทคนิคที่น่าสนใจ และสามารถตอบโจทย์เพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิค ดังกล่าวมาข้างต้นได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาเทคนิคการ เตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ BiVO_4 ด้วย เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า และเทคนิคการจุ่มเคลือบ ที่ สามารถขยายสเกลได้ดีและกระบวนการไม่ยุ่งยาก โดย เน้นการพัฒนาเรื่องการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้า ขั้วไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารอินทรีย์สี ย้อม ที่เป็นต้นเหตุของปัญหามลภาวะทางน้ำ ซึ่งทำให้ เกิดความเป็นพิษกับสัตว์น้ำ พืชเนิยภาพ และปริมาณการ ละลายได้ของออกซิเจนในสารละลายน้ำ ซึ่งงานวิจัย ดังกล่าวนี้นี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อการประยุกต์ใช้กับ การบำบัดน้ำเสียในภาคอุตสาหกรรมต่างๆที่มีสารอินทรีย์ ปนเปื้อนอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / BiVO_4

กระจกนำไฟฟ้า Indium Doped Tin Oxide (ITO) ขนาด กว้างxยาวxหนา เท่ากับ $2 \times 3 \times 0.3$ เซนติเมตร ถูกใช้เป็นวัสดุรองรับเพื่อเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโดย การเตรียมพื้นที่ผิวก่อนการเตรียมฟิล์มด้วยการจุ่มใน สารละลายเพื่อทำความสะอาดและเตรียมผิวหน้าตัว รองรับพร้อมกับการใช้เครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic) ในสารละลายตามลำดับต่อไปนี้ (1) ในสารละลาย ดีเทอร์เจนท์ (Detergent) เป็นเวลา 15 นาที (2) ใน สารละลาย 3 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 30 นาที (3) ในสารละลายเอทานอล เป็นเวลา 15 นาทีและ (4) ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) เป็นเวลา 15 นาที เมื่อได้ขั้วไฟฟ้ารองรับที่สะอาดและมีพื้นที่ผิวที่ เหมาะสมแล้วนำไปตรึงฟิล์ม WO_3 ด้วยเทคนิคทาง เคมีไฟฟ้าโดยใช้กระจกนำไฟฟ้า ITO เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และ ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้า ช่วยทำการตรึงด้วยการจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสามลงใน

สารละลายผสมของ 0.0125 M โซเดียมทังสเตดไดไฮไดรด์ ($\text{H}_4\text{Na}_2\text{O}_6\text{W}$) 0.015 M ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และ 0.55 M กรดไนตริก (HNO_3) ทำการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -0.5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 ที่เตรียมได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากขั้วไฟฟ้าเย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปจุ่มลงไปในการละลาย 0.1 M BiVO_4 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะได้ขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / BiVO_4 เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่อไป

การศึกษาคุณลักษณะและสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกในการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

นำขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / BiVO_4 ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (SHIMADZU, UV-2401PC) และสมบัติความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารละลาย 0.1 M Na_2SO_4 โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ 1.0 โวลต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (AMETEK, Versa STAT 3) ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงช่วงตามองเห็นโดยใช้หลอดแสงขาวแอลอีดี (White Light-emitting Diode Lamp) กำลังไฟ 12 วัตต์ (LED Bulb E27, Philips) และ ศึกษากลไกการเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสลายตัวของสีย้อมด้วยกลไกโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic; PC) อิเล็กโตรคะตะไลติก (Electrocatalytic; EC) และโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติก (Photoelectrocatalytic; PEC) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อมในสารละลายน้ำ โดยเลือกใช้สารละลาย 5 mg/L เมทิลีนบลูเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์สีย้อมและติดตามค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ณ

เวลาต่าง ๆ โดยคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม (Dye Degradation; %) ตามสมการที่ 1

$$\text{Dye Degradation (\%)} = ((A_0 - A_t)/A_0) \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์สีย้อม ณ เวลาเริ่มต้นก่อนกระบวนการกำจัด

A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์สีย้อมที่ผ่านกระบวนการกำจัด ณ เวลา t

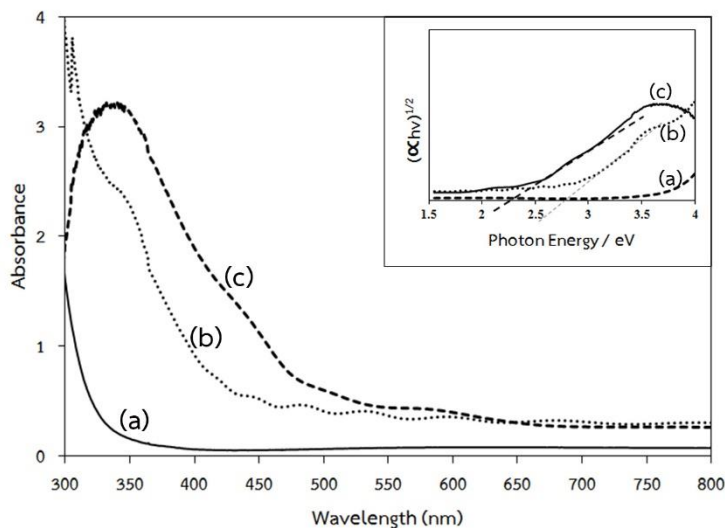
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / BiVO_4

รูปที่ 1 แสดงผลจากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้พบว่า ขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 สามารถดูดกลืนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่น 450 nm ซึ่งแตกต่างจากขั้วไฟฟ้า ITO ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับที่มีการดูดกลืนแสงในช่วงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 330 nm และเมื่อตรึง BiVO_4 ลงบนขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 พบว่า ITO/ WO_3 / BiVO_4 มีสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นเพิ่มขึ้นโดยเริ่มดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 525 nm เมื่อนำไปคำนวณค่าพลังงานแถบ (Band Gap Energy, E_g) จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าการดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบของขั้วไฟฟ้าแอโนด ดังแสดงในรูปแทรก รูปที่ 1 ได้ค่าพลังงานแถบของ ITO/ WO_3 เท่ากับ 2.80 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานแถบของ WO_3 (22, 38) และ ค่าพลังงานแถบของ ITO/ WO_3 / BiVO_4 เท่ากับ 2.36 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานแถบของ BiVO_4 (39, 40) จากผลการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้สามารถยืนยันสมบัติเชิงแสงในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นทั้ง WO_3 และ BiVO_4 ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 และ ITO/ WO_3 / BiVO_4 โดยแสงช่วงตามองเห็นจะมีปริมาณมากในช่วงแสงธรรมชาติทำให้ขั้วไฟฟ้างดกลืนแสงได้มากซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการนำไปใช้งานภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงต่อไป และที่สำคัญยัง

สามารถยืนยันประสิทธิภาพของเทคนิคการตรึงฟิล์มบาง WO_3 ลงบนผิวหน้า กระเจงนำไฟฟ้า ITO ด้วยเทคนิคการตรึงแบบเคมีไฟฟ้า และ การตรึง BiVO_4 ลงบนผิวหน้า

ขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 1 การดูดกลืนแสงและความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงานแถบขั้วไฟฟ้าของ (a) ITO (b) ITO/ WO_3 และ (c) ITO/ WO_3 / BiVO_4

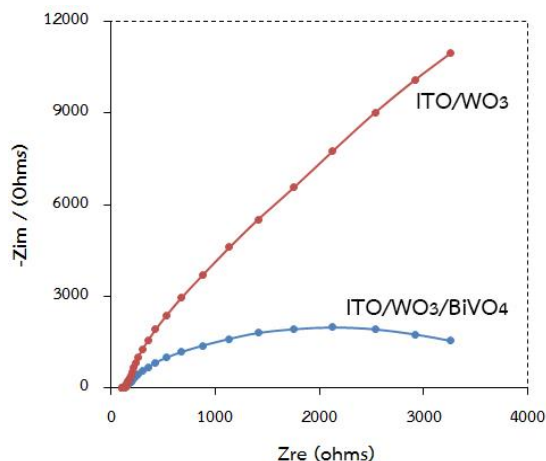
สมบัติความต้านทานทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) เป็นการศึกษาความต้านทานเชิงเคมีไฟฟ้าในการส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและสารละลาย เพื่อทดสอบสมบัติการส่งผ่านอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าแอโนด ITO/ WO_3 และ ITO/ WO_3 / BiVO_4 สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายน้ำภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงในช่วงที่ตามองเห็น จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นผล Nyquist Plot โดยพิจารณาจากลักษณะครึ่งวงกลมที่มีลักษณะที่แคบลงอย่างชัดเจนเมื่อตรึง BiVO_4 ลงบนขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 แสดงให้เห็นถึงผลของการเพิ่มรอยต่อของสารกึ่งตัวนำระหว่าง WO_3 / BiVO_4 ทำให้อัตราการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้าได้เร็วมากขึ้น ซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์รวมกันของอิเล็กตรอน (e^-) กับช่องว่าง (hole, h^+) (Recombination Effect) ได้เป็น

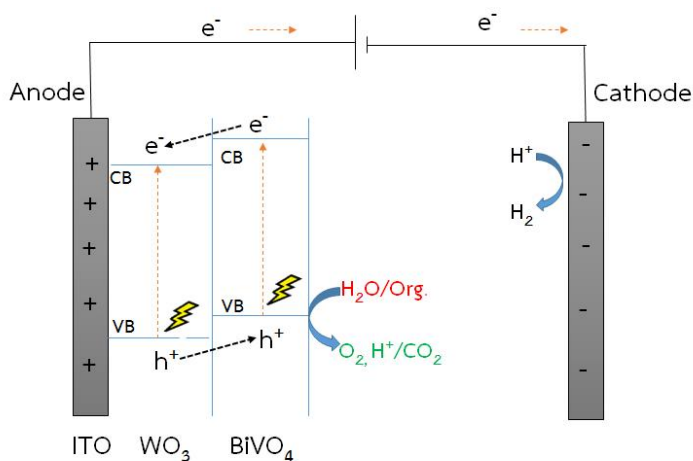
อย่างดี (41, 42) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นในกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำเพียงแค่นิดเดียว จากผลการศึกษาดังกล่าว สามารถยืนยันหลักการพัฒนาขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยการเพิ่มรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำ (Heterojunction) เพื่อช่วยเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยลดปรากฏการณ์ Recombination ได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 3 แสดง Schematic Diagram การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / BiVO_4 ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า สามารถอธิบายการพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้วยการเพิ่มรอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible Light) ซึ่งมีปริมาณมากในแสงธรรมชาติ จะสามารถกระตุ้นให้เกิดการแยกกันของ e^- ที่ชั้นการนำ (Conduction Band; CB) และ h^+ เกิดขึ้นที่ชั้นวาเลนซ์ (Valent Band; VB) ของสารกึ่งตัวนำทั้ง WO_3 และ BiVO_4 สำหรับ e^- ที่ชั้น CB ของ BiVO_4 จะถ่ายโอนไปยังชั้น CB ของ WO_3 และภายใต้สภาวะเร่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

(Anode Electrode) ด้วยศักย์ไฟฟ้าด้านบวกสามารถเหนี่ยวนำ e^- ที่ชั้น CB ของ WO_3 เข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งช่วยลดการไหลกลับไปรวมกันของ e^- และ h^+ (Recombination Effect) ของทั้งสองสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี สำหรับ h^+ ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง VB ของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง จะเกิดการถ่ายโอน h^+ จากชั้น VB ของ WO_3 ไปยัง ชั้น VB ของ $BiVO_4$ ส่งผลให้เกิด h^+ จำนวนมากที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ ประกอบกับ ณ ตำแหน่ง VB ของสารกึ่งตัวนำ $BiVO_4$ ที่มีศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกมาก ซึ่งจะทำให้มีศักยภาพสูงในการออกซิไดส์สารต่าง ๆ ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทั้งการออกซิไดซ์น้ำ และสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจากผลการศึกษาดังกล่าวนี้นี้ สามารถยืนยันได้ถึงคุณสมบัติโฟโตอิเล็กโตรคะตะไลติกที่ดีของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ในการนำไปศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ต่อไป



รูปที่ 2 Nyquist Plot ของขั้วไฟฟ้าแอโนด ITO/ WO_3 และ ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ ในสารละลาย 0.1 M Na_2SO_4 ภายใต้สภาวะแรงแสงช่วงตามองเห็น และการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ 1.0 V



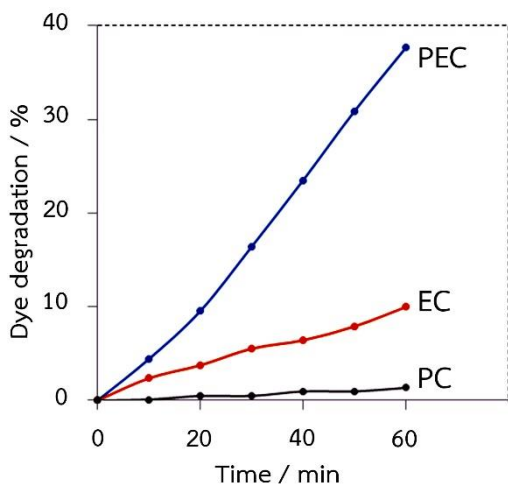
รูปที่ 3 Schematic Diagram การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ ภายใต้สภาวะแรงด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า

ผลการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อม

หลังจากได้พัฒนาการเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ และศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เรียบร้อยแล้วได้ประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยการศึกษาค้นคว้าของกลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ITO/ WO_3 / $BiVO_4$ คือกลไกที่

เร่งด้วยแสงอย่างเดียว (PC) กลไกที่เร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าอย่างเดียว (EC) และกลไกที่เร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน (PEC) จากรูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 กลไก พบว่า กลไกการเร่งปฏิกิริยาการกำจัดแบบ PEC มี

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู มากกว่ากลไก EC และ PC ถึง 4 และ 10 เท่า ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะเหนี่ยวนำ e^- ให้แยกออกจาก h^+ ได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์รวมกันของ e^- และ h^+ (Recombination Effect) ที่จะเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำภายในตัวกลไก PC ที่ e^- ที่ชั้น CB สามารถกลับมารวมกับ h^+ ที่ชั้น VB ได้ง่าย และการเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำด้วยแสงจะช่วยลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องให้ที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งต่ำกว่ากลไก EC อย่างเดียวที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าสูงมากเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากลไกการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สีย้อมจะต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำผสม $WO_3/BiVO_4$ ทั้งศักย์ไฟฟ้าและแสงพร้อมๆกัน เทคนิคดังกล่าวนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในระดับสเกลที่ใหญ่ขึ้นในอุตสาหกรรมประเภทสีย้อม และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้ กลไก PEC EC และ PC

สรุปผล

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $WO_3/BiVO_4$ ลงบนกระจก

นำไฟฟ้า ITO โดยการตรึง WO_3 ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า ลงบนตัวรองรับ ITO และตรึงฟิล์ม $BiVO_4$ ลงบนผิวหน้า ITO/ WO_3 ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ สามารถยืนยันสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นของขั้วไฟฟ้า ITO/ $WO_3/BiVO_4$ การตรึง $BiVO_4$ ลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำ WO_3 สามารถเพิ่มสมบัติการดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นได้มากขึ้น และยังสามารถช่วยเร่งการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ITO/ $WO_3/BiVO_4$ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการตรึงฟิล์มสารกึ่งตัวนำดังกล่าวทำให้ได้ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำผสม $WO_3/BiVO_4$ บนตัวรองรับกระจกนำไฟฟ้า ITO ที่มีสมบัติของฟิล์มที่ดี กระบวนการเตรียมฟิล์มไม่ยุ่งยาก และยังสามารถใช้ในการขยายขนาดสเกลเพื่อใช้งานในระบบที่ใหญ่ขึ้น ที่สำคัญขั้วไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำ ITO/ $WO_3/BiVO_4$ ที่เตรียมได้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับเซลล์โฟโตอิเล็กโตรเคตะไลติกกับการกำจัดสารอินทรีย์สีย้อมได้เป็นอย่างดี ภายใต้สภาวะเร่งด้วยแสงและศักย์ไฟฟ้า จากงานวิจัยดังกล่าวนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมประเภทสีย้อมและอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการแปรรูปของสารอินทรีย์อื่น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท สยามเควดวา เทคโนโลยีลอปเม้นท์ ซีเอสเอ็มเอส จำกัด ที่ร่วมสนับสนุนทุนวิจัย ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท (MSD61I0073)

เอกสารอ้างอิง

1. Orimolade BO, Zwane BN, Koiki BA, Tshwenya L, Peleyeju GM, Mabuba N, et al. Solar photoelectrocatalytic degradation of ciprofloxacin at a FTO/ $BiVO_4/MnO_2$ anode: Kinetics, intermediate products and

- degradation pathway studies. *J Environ Chem. Eng.* 2020;8(1):103607.
2. Murugan C, Bhojanaa KB, Ong W-J, Jothivenkatachalam K, Pandikumar A. Improving hole mobility with the heterojunction of graphitic carbon nitride and titanium dioxide via soft template process in photoelectrocatalytic water splitting. *Int J Hydrogen Energ.* 2019;44(59):30885-98.
3. Wang L, Wei Y, Fang R, Wang J, Yu X, Chen J, et al. Photoelectrocatalytic CO₂ reduction to ethanol via graphite-supported and functionalized TiO₂ nanowires photocathode. *J Photoch Photobio A.* 2020;391:112368.
4. Mafa PJ, Kuvarega AT, Mamba BB, Ntsendwana B. Photoelectrocatalytic degradation of sulfamethoxazole on g-C₃N₄/BiOI/EG p-n heterojunction photoanode under visible light irradiation. *Appl Surf Sci.* 2019;483:506-20.
5. Hunge YM, Yadav AA, Kulkarni SB, Mathe VL. A multifunctional ZnO thin film based devices for photoelectrocatalytic degradation of terephthalic acid and CO₂ gas sensing applications. *Sensor Actuat B-Chem.* 2018;274:1-9.
6. Huda A, Suman PH, Torquato LDM, Silva BF, Handoko CT, Gulo F, et al. Visible light-driven photoelectrocatalytic degradation of acid yellow 17 using Sn₃O₄ flower-like thin films supported on Ti substrate (Sn₃O₄/TiO₂/Ti). *J Photoch Photobio A.* 2019;376:196-205.
7. Hunge YM, Mahadik MA, Patil VL, Pawar AR, Gadakh SR, Moholkar AV, et al. Visible light assisted photoelectrocatalytic degradation of sugarcane factory wastewater by sprayed CZTS thin films. *J Phys Chem Solids.* 2017;111:176-81.
8. Shah BR, Patel UD. Aqueous pollutants in water bodies can be photocatalytically reduced by TiO₂ nano-particles in the presence of natural organic matters. *Sep Purif Technol.* 2019;209:748-55.
9. Wang N, Pan Y, Dai W, Wu S, Zhu Y-a, Zhang E. Dealloying synthesis of SnO₂/TiO₂ solid solution and composite nanoparticles with excellent photocatalytic activity. *Appl Surf Sci.* 2018;457:200-7.
10. Yu J, Zou J, Xu P, He Q. Three-dimensional photoelectrocatalytic degradation of the opaque dye acid fuchsin by Pr and Co co-doped TiO₂ particle electrodes. *J Clean Prod.* 2020;251:119744.
11. Liu W, Yang Y, Zhan F, Li D, Li Y, Tang X, et al. Ultrafast fabrication of nanostructure WO₃ photoanodes by hybrid microwave annealing with enhanced photoelectrochemical and photoelectrocatalytic activities. *Int J Hydrogen Energ.* 2018;43(18):8770-8.
12. Fu Y, Dong C-L, Zhou W, Lu Y-R, Huang Y-C, Liu Y, et al. A ternary nanostructured α -Fe₂O₃/Au/TiO₂ photoanode with reconstructed interfaces for efficient

- photoelectrocatalytic water splitting. *App Catal B-Environ.* 2020;260:118206.
13. Iervolino G, Tantis I, Sygellou L, Vaiano V, Sannino D, Lianos P. Photocurrent increase by metal modification of Fe_2O_3 photoanodes and its effect on photoelectrocatalytic hydrogen production by degradation of organic substances. *Appl Surf Sci.* 2017;400:176-83.
 14. Madusanka HTDS, Herath HMAMC, Fernando CAN. High photoresponse performance of self-powered n- Cu_2O /p- CuI heterojunction based UV-Visible photodetector. *Sensor Actuat A-Phys.* 2019;296:61-9.
 15. Abdelfatah M, Ismail W, El-Shaer A. Low cost inorganic white light emitting diode based on submicron ZnO rod arrays and electrodeposited Cu_2O thin film. *Mat Sci Semicon Proc.* 2018;81:44-7.
 16. Rosas-Laverde NM, Pruna A, Cembrero J, Orozco-Messana J, Manjón FJ. Performance of graphene oxide-modified electrodeposited $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}$ heterojunction solar cells. *Bol Soc Esp Cerami V.* 2019;58(6):263-73.
 17. Kiama N, Ponchio C. Photoelectrocatalytic performance improvement of BiVO_4 thin film fabrication via effecting of calcination temperature strategy. *Surf Coat Tech.* 2020;383:125257.
 18. Li F, Leung DYC. Highly enhanced performance of heterojunction $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{BiVO}_4$ photoanode for photoelectrocatalytic hydrogen production under solar light irradiation. *Chem Eng Sci.* 2020;211:115266.
 19. Guo Z, Wei J, Zhang B, Ruan M, Liu Z. Construction and photoelectrocatalytic performance of $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ heterojunction modified with cobalt phosphate. *J Alloy Compd.* 2020;821:153225.
 20. Yun G, Balamurugan M, Kim H-S, Ahn K-S, Kang SH. Role of WO_3 Layers Electrodeposited on SnO_2 Inverse Opal Skeletons in Photoelectrochemical Water Splitting. *J Phys Chem C.* 2016;120(11):5906-15.
 21. Kangkun N, Kiama N, Saito N, Ponchio C. Optical properties and photoelectrocatalytic activities improvement of WO_3 thin film fabricated by fixed-potential deposition method. *Optik.* 2019;198:163235.
 22. Martins AS, Cordeiro-Junior PJM, Bessegato GG, Carneiro JF, Zanoni MVB, Lanza MRdV. Electrodeposition of WO_3 on Ti substrate and the influence of interfacial oxide layer generated in situ: A photoelectrocatalytic degradation of propyl paraben. *Appl Surf Sci.* 2019;464:664-72.
 23. Sonu, Dutta V, Sharma S, Raizada P, Hosseini-Bandegharaei A, Kumar Gupta V, et al. Review on augmentation in photocatalytic activity of CoFe_2O_4 via heterojunction formation for photocatalysis of organic pollutants in water. *J Saudi Chem Soc.* 2019;23(8):1119-36.
 24. Su J, Guo L, Bao N, Grimes CA. Nanostructured $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ Heterojunction Films for Efficient

- Photoelectrochemical Water Splitting. *Nano Lett.* 2011;11(5):1928-33.
25. Du H, Pu W, Wang Y, Yan K, Feng J, Zhang J, et al. Synthesis of BiVO₄/WO₃ composite film for highly efficient visible light induced photoelectrocatalytic oxidation of norfloxacin. *J Alloy Comd.* 2019;787:284-94.
 26. Zeng Q, Lyu L, Gao Y, Chang S, Hu C. A self-sustaining monolithic photoelectrocatalytic/photovoltaic system based on a WO₃/BiVO₄ photoanode and Si PVC for efficiently producing clean energy from refractory organics degradation. *Appl Catal B- Environ.* 2018;238:309-17.
 27. Emin S, de Respinis M, Fanetti M, Smith W, Valant M, Dam B. A simple route for preparation of textured WO₃ thin films from colloidal W nanoparticles and their photoelectrochemical water splitting properties. *Appl Catal B-Environ.* 2015;166-167:406-12.
 28. Zhou L, Wu Y, Wang L, Yang Y, Na Y. Excellent performance of water oxidation at low bias potential achieved by transparent WO₃/BiVO₄ photoanode integrated with molecular nickel porphyrin. *Inorg Chem Commun.* 2019;107:107480.
 29. S M, Margoni MM, Ramamurthi K, Babu RR, V G. Hydrothermal assisted growth of vertically aligned platelet like structures of WO₃ films on transparent conducting FTO substrate for electrochromic performance. *Appl Surf Sci.* 2018;449:77-91.
 30. Kolhe PS, Mutadak P, Maiti N, Sonawane KM. Synthesis of WO₃ nanoflakes by hydrothermal route and its gas sensing application. *Sensor Actuat A-Phys.* 2020;304:111877.
 31. Hunge YM, Yadav AA, Mahadik MA, Mathe VL, Bhosale CH. A highly efficient visible-light responsive sprayed WO₃/FTO photoanode for photoelectrocatalytic degradation of brilliant blue. *J Taiwan Inst Chem E.* 2018;85:273-81.
 32. Poongodi S, Kumar PS, Mangalaraj D, Ponpandian N, Meena P, Masuda Y, et al. Electrodeposition of WO₃ nanostructured thin films for electrochromic and H₂S gas sensor applications. *J Alloy Comd.* 2017;719:71-81.
 33. Kwong WL, Nakaruk A, Koshy P, Sorrell CC. Photoelectrochemical properties of WO₃ nanoparticulate thin films prepared by carboxylic acid-assisted electrodeposition. *Thin Solid Films.* 2013;544:191-6.
 34. Wei Z, Hai Z, Akbari MK, Zhao Z, Sun Y, Hyde L, et al. Surface functionalization of wafer-scale two-dimensional WO₃ nanofilms by NM electrodeposition (NM = Ag, Pt, Pd) for electrochemical H₂O₂ reduction improvement. *Electrochim Acta.* 2019;297:417-26.
 35. Zeng Q, Li J, Bai J, Li X, Xia L, Zhou B. Preparation of vertically aligned WO₃ nanoplate array films based on peroxotungstate reduction reaction and

- their excellent photoelectrocatalytic performance. *Appl Catal B-Environ.* 2017;202:388-96.
36. Xia T, Chen M, Xiao L, Fan W, Mao B, Xu D, et al. Dip-coating synthesis of P-doped BiVO₄ photoanodes with enhanced photoelectrochemical performance. *J Taiwan Inst Chem E.* 2018;93:582- 9.
 37. Venkatesan R, Velumani S, Ordon K, Makowska-Janusik M, Corbel G, Kassiba A. Nanostructured bismuth vanadate (BiVO₄) thin films for efficient visible light photocatalysis. *Mater Chem Phys.* 2018;205:325-33.
 38. Martins AS, Nuñez L, Lanza MRdV. Enhanced photoelectrocatalytic performance of TiO₂ nanotube array modified with WO₃ applied to the degradation of the endocrine disruptor propyl paraben. *J Electroanal Chem.* 2017;802:33-9.
 39. Li F, Zhao W, Leung DYC. Enhanced photoelectrocatalytic hydrogen production via Bi/BiVO₄ photoanode under visible light irradiation. *Appl Catal B-Environ.* 2019;258:117954.
 40. Xi L, Jin Z, Sun Z, Liu R, Xu L. Enhanced photoelectrocatalytic performance for water oxidation by polyoxometalate molecular doping in BiVO₄ photoanodes. *Appl Catal A-Gen.* 2017;536:67-74.
 41. Wu Z, Ouyang M, Wang D. Construction of WS₂/MoSe₂ heterojunction for efficient photoelectrocatalytic hydrogen evolution. *Mat Sci Semicon Proc.* 2020;107:104822.
 42. Jiang T, Cheng L, Han Y, Feng J, Zhang J. One-pot hydrothermal synthesis of Bi₂O₃-WO₃ p-n heterojunction film for photoelectrocatalytic degradation of norfloxacin. *Sep Purif Technol.* 2020;238:116428.



การเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันผ่านกลไกการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์

High-Performance Preparation of Polymer Particle by Emulsion Polymerization via Polymerization Induced Self-Assembly Mechanism

เนตรนภา กำลังมาก¹ อรรถณ เอี่ยมประเสริฐ¹ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์^{1,2} สติติ ไพรรพฤษ³ และ อมร ไชยสัตย์^{1,2*}

Netnapha Kamlangmak¹, Utt Eiamprasert¹, Preeyaporn Chaiyasat^{1,2} Satit Praipruke³

and Amorn Chaiyasat^{1,2*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²หน่วยวิจัยออกแบบและพัฒนาวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

³บริษัท เคมออล จำกัด ต.บางรักน้อย อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

²Advanced Material Design and Development (AMDD) Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

³Chemall CO., Ltd., Bangruknoi, Nonthaburi 11000, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 5 March, 2020

Revised: 16 March, 2020

Accepted: 19 March, 2020

Available online: 6 April, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.3

Keywords:

particle nucleation, macro-chain transfer agent,

This research aims to compare the particle nucleation mechanism in an emulsion polymerization for polymer particle preparation. The recent particle formation as polymerization induced self-assembly (PISA) was used to produce the polymer particles containing positive charge on their surface compared with the well-known mechanism as homogeneous nucleation in emulsion conventional polymerization (emulsion CRP) without an emulsifier. It is well-known that the PISA can be used in various controlled/living polymerization techniques. In this work, the polymer particle was

polymerization induced polymerized via emulsion iodine transfer polymerization (emulsion ITP). self-assembly, emulsion ITP The positive charge polymer chain of 12 repeating units of poly([2-(methacryloyloxy) ethyl] trimethyl-ammonium chloride)₁₂- iodide (PMTMA₁₂-I) was firstly polymerized before being used as macro-chain transfer agent and emulsifier in the emulsion ITP of poly(methyl methacrylate) (PMMA) to obtain block copolymer of PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈. The particle size and particle size distribution, the positive charge on their surface and polymerization rate were investigated for both mechanisms. It was found that using emulsion ITP, the polymerization rate was not different from emulsion CRP. In addition, the particle size (227 nm) and particle size distribution (PDI = 1.11) were smaller and narrower for emulsion ITP than those of emulsion CRP (232 nm and PDI = 1.22, respectively). It may be due to a higher positive charge (+59.86 mV) of emulsion ITP than it's (+39.65 mV) of emulsion CRP. For all results indicated that emulsion ITP represents high performance for PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈ particle preparation.

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบกลไกการเกิดอนุภาคในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันสำหรับเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ โดยเปรียบเทียบกลไกการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์กับกลไกการเกิดอนุภาคแบบเอกพันธ์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันทั่วไป (อิมัลชัน ซีอาร์พี) ในการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีประจุบวกที่ผิว โดยไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว เป็นที่ทราบกันดีว่าการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์ สามารถใช้กับเทคนิคคอลโทรล/ลิฟวิ่ง พอลิเมอร์ไรเซชันต่าง ๆ ในงานนี้อนุภาคพอลิเมอร์จะถูกสังเคราะห์ผ่านอิมัลชันไอโอดีน ทรานสเฟอพอลิเมอร์ไรเซชัน (อิมัลชัน ไอทีพี) โดยสายโซ่พอลิเมอร์ประจุบวกยาว 12 หน่วยซ้ำของพอลิ ([2-(เมทาคริลอิลออกซี)เอทิล]ไตรเมทิล-แอมโมเนียม คลอไรด์)-ไอโอดัด (พีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-ไอ) จะถูกสังเคราะห์ก่อนที่จะถูกนำมาใช้เป็นสารโยกย้ายสายโซ่หมักและสารลดแรงตึงผิว ในอิมัลชัน ไอทีพี ของ

พอลิ(เมทิล เมทาคริเลต) (พีเอ็มเอ็มเอ) ในการเตรียมบล็อกโคพอลิเมอร์ของ พีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-บิ-พีเอ็มเอ็มเอ₅₀₈ ที่สภาวะ pH~4 และเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง โดยจะศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค ประจุบวกบนผิวอนุภาคและอัตราการสังเคราะห์พอลิเมอร์ของกลไกทั้งสอง ซึ่งพบว่าอัตราการสังเคราะห์พอลิเมอร์ของอิมัลชัน ไอทีพี ไม่ได้แตกต่างจากอิมัลชัน ซีอาร์พี นอกจากนี้พบว่าขนาดอนุภาค (227 นาโนเมตร) และการกระจายตัวของขนาด (พดีไอ = 1.11) ของอิมัลชัน ไอทีพี จะเล็กกว่าและแคบกว่าของอิมัลชัน ซีอาร์พี (232 นาโนเมตร และ พดีไอ = 1.22 ตามลำดับ) อาจเนื่องมาจากในกรณีของอิมัลชัน ไอทีพี อนุภาคมีประจุบวก (+59.86 เอ็มวี) มากกว่าของอิมัลชัน ซีอาร์พี (+39.65 เอ็มวี) จากผลการทดลองทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าอิมัลชัน ไอทีพี มีประสิทธิภาพสูงกว่าอิมัลชัน ซีอาร์พี ในการเตรียมอนุภาคพีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-บิ-พีเอ็มเอ็มเอ₅₀₈ ซึ่งอิมัลชันที่มีประสิทธิสูงจะมีประโยชน์กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเสถียรทางคอลลอยด์สูง เช่น น้ำมันหล่อเย็น

โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตัด เจาะเนื้อโลหะ

คำสำคัญ: กลไกการเกิดอนุภาค สารโพลิเมอร์สายโซ่มหภาคไอโอไดต์ การเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์ อิมัลชัน ไอทีพี

บทนำ

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) เป็นกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ได้ในระดับนาโนเมตร มีมวลโมเลกุลสูง และสามารถนำผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ไปใช้ได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องทำบริสุทธิ์ก่อนใช้งาน โดยทั่วไปในกระบวนการสังเคราะห์จะประกอบด้วยมอนอเมอร์ตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) น้ำ (วัฏภาคต่อเนื่อง) และสารลดแรงตึงผิว (1-3) กลไกการเกิดอนุภาค (Particle Nucleation) ของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กลไกการเกิดอนุภาคแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) และกลไกการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ (Micellar Nucleation) (4) โดยกลไกการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ เป็นกลไกที่ได้รับความนิยมใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากอนุภาคพอลิเมอร์จะเกิดในไมเซลล์ โดยที่โอลิโกเมอร์ที่มือนูคลีโอสระ (Oligomeric Radical) ที่เกิดการต่อสายโซ่พอลิเมอร์ในน้ำระหว่างอนุคลีโอสระกับมอนอเมอร์ เมื่อมีความยาวของสายโซ่จนถึงจุดที่มีความไม่ชอบน้ำมากกว่าความชอบน้ำ (5-8) เรียกว่า Surface Active หรือ Z-mer จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์และสังเคราะห์พอลิเมอร์ภายใน ทำให้อนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้มีความเสถียรสูง เนื่องจากมีสารลดแรงตึงผิวเคลือบอยู่ที่ผิวทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของอนุภาค โดยอาศัยกลไกต่าง ๆ (9, 10) เช่น การผลักกันด้วยความเกะกะ (Steric Repulsion) และด้วยประจุไฟฟ้า

(Electrostatic Repulsion) ของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Emulsifier) และที่มีประจุ (Ionic Emulsifier) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการที่มีสารลดแรงตึงผิวเคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ อาจเป็นข้อด้อยในอุตสาหกรรมบางอย่าง ที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ในกรณีของกลไกการเกิดอนุภาคแบบเอกพันธ์ อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากไม่ใช้สารลดแรงตึงผิวในกระบวนการสังเคราะห์ หรือใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่น้อยกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micell Concentration; CMC) ซึ่งในระบบจะไม่มีไมเซลล์ ซึ่งอนุภาคจะเกิดขึ้นผ่านการประกอบตัวเอง (Self-Assembly) ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ในน้ำมีความยาวมากจนไม่สามารถละลายน้ำได้ เรียกว่า $J_{critical}$ (J_{crit}) สายโซ่พอลิเมอร์จะรวมตัวและหันส่วนที่ชอบน้ำออกข้างนอกเพื่อสัมผัสกับน้ำและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากัน กลายเป็นอนุภาคเริ่มต้น (Preparticle) และสังเคราะห์ต่อไปจนได้ผลิตภัณฑ์อนุภาคพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากไม่มีการใช้สารลดแรงตึงผิว อนุภาคพอลิเมอร์จะมีความเสถียรค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ การใช้งานในอุตสาหกรรมจึงไม่ค่อยนิยมเท่าที่ควร (5, 9, 11)

เมื่อไม่นานมานี้การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันที่ใช้กลไกคอลโทรล/ลิฟวิง (Emulsion Controlled/Living Radical Polymerizations; Emulsion CLRP) กำลังได้รับความนิยม ไม่เพียงแต่สามารถควบคุมมวลโมเลกุลให้มีการกระจายตัวที่แคบเตรียมบล็อกโคพอลิเมอร์ได้ แต่ยังสามารถเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ให้มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง เนื่องจากการเกิดอนุภาคจะเกิดผ่านกลไกการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization Induced Self-assembly; PISA) (10, 11) โดยที่อนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้จะเป็นบล็อกโคหรือ

เทอร์พอลิเมอร์ ที่ซึ่งบล็อกของส่วนไม่มีขั้วจะอยู่ภายในอนุภาคพอลิเมอร์ ในขณะที่บล็อกของส่วนมีขั้วจะฝังอยู่ที่ผิวและไม่หลุดออกมาบนเพื่อนในผลิตภัณฑ์เมื่อนำไปใช้งาน โดยที่การเกิดอนุภาคผ่านกลไกการเหนี่ยวนำให้ประกอบตัวเองด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์จะนิยมเตรียมด้วยเทคนิครีเวอร์สซิเบิล แอดดิชัน-แฟรกเมนเทชัน เช่น ทรานสเฟอ (Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer; RAFT) (12-14) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมการกระจายตัวของมวลโมเลกุล อย่างไรก็ตาม การที่จะนำเอาเทคนิคการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันที่ใช้กลไกคอลโทรล/ลิฟวิ่ง ไปใช้ในอุตสาหกรรม ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากใช้เวลาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ค่อนข้างนานเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันทั่วไป ในวิทยกอนหนานี้ (15) พบว่า การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันที่ใช้กลไก ไอโอดีน ทรานสเฟอพอลิเมอร์ไรเซชัน (อิมัลชัน ไอทีพี) (Emulsion Iodine Transfer Polymerization; Emulsion ITP) อนุภาคพอลิเมอร์ของพอลิ (เมทาคริลิก แอซิด) - บิ-พอลิสไตรีน (Poly(methacrylic acid)-b-polystyrene; PMAA-b-PS) ที่มีประจุลบอยู่ที่ผิว มีความเสถียรสูงและมีขนาดในระดับนาโนเมตร และที่สำคัญอัตราการสังเคราะห์พอลิเมอร์ค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุลค่อนข้างกว้างก็ตาม ซึ่งน่าจะมีศักยภาพในการเตรียมในระดับอุตสาหกรรมได้

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอิมัลชัน ไอทีพี ที่สามารถเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์ได้หลากหลาย ในงานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ที่มีประจุบวกที่ผิวคือ พีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-บิ-พีเอ็มเอ็มเอ₅₀₈ (P(MTMA)₁₂-b-PMMA₅₀₈) โดยใช้พอลิ ([2-(เมทาคริลอิลออกซี)เอทิล]ไตรเมทิล-แอมโมเนียม คลอไรด์)-ไอโอดิฟอร์ม (พีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-ไอ) (P(MTMA)₁₂-I) ที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบสารละลายเป็นสารโพลิเมอร์สายโซ่พหุภาคและสารลดแรงตึงผิว โดยจะเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับอิมัลชัน ซีอาร์พี

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี

[2-(เมทาคริลอิลออกซี)เอทิล]ไตรเมทิล-แอมโมเนียม คลอไรด์ ([2-(Methacryloyloxy) ethyl] trimethyl-ammonium chloride; MTMA, Sigma-Aldrich) ไอโอดิฟอร์ม (Iodoform; CHI₃, Sigma-Aldrich) คลอโรฟอร์ม (Chloroform; CHCl₃, RCI Labscan) 2, 2'-อะโซบิส (ไอโซบิวทิว อะมิไดน์) ไดไฮโดร คลอไรด์ (2,2'-azobis(isobutyl amidine)dihydrochloride; AIBA, Wako) และเอทานอล (Ethanol; CH₃CH₂OH, RCI Labscan) จะใช้โดยไม่ต้องทำบริสุทธิ์ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide; BPO, Merck) จะทำการตกตะกอนในเมทานอลก่อนใช้งาน เมทิล เมทาคริเลต (Methyl Methacrylate; MMA, Sigma-Aldrich) จะทำบริสุทธิ์ด้วยการผ่านคอลัมน์ที่มีลูมินัม ออกไซด์ชนิดเบสเป็นวัฏภาคคงที่ ก่อนนำไปใช้ในการสังเคราะห์

วิธีการทดลอง

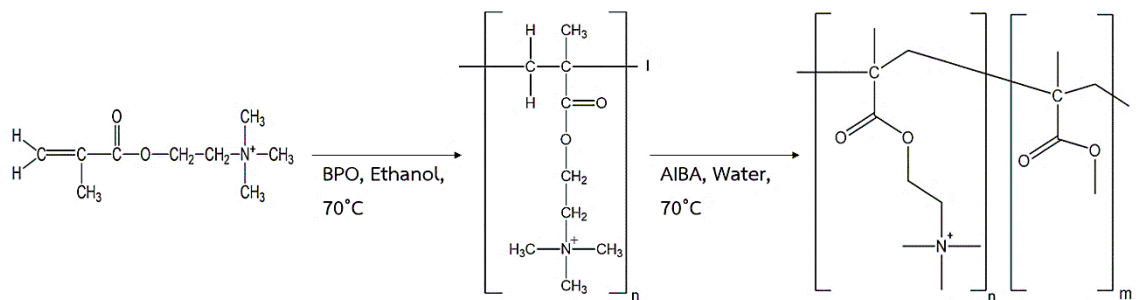
1. การเตรียมสารโพลิเมอร์สายโซ่พหุภาค โดยกระบวนการสังเคราะห์แบบสารละลายด้วยกลไกไอทีพี

ละลาย [2-(เมทาคริลอิลออกซี)เอทิล]ไตรเมทิล-แอมโมเนียม คลอไรด์ และไอโอดิฟอร์ม ที่อัตราส่วนโมล 1:10 ให้เป็นเนื้อเดียวกันในตัวทำละลายเอทานอล เทใส่ในขวดก้นกลมพร้อมกับปิดด้วยจุกยางซิลิโคน และทำให้เป็นสุญญากาศโดยใช้ปั๊มดูดสลับกับการเป่าแก๊สไนโตรเจนประมาณ 5 รอบ จากนั้นนำขวดก้นกลมไปแช่ในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการปั่น 500 รอบต่อนาที เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ทำการฉีดตัวริเริ่มปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอล) แล้วทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สารโพลิเมอร์สายโซ่พหุภาคที่ได้คือ พอลิ([2-(เมทาคริลอิลออกซี)เอทิล]ไตรเมทิล-แอมโมเนียม คลอไรด์)-12-ไอโอดิฟอร์ม (P(MTMA)₁₂-I)

2. การเตรียมอนุภาคพีเอ็มทีเอ็มเอ₁₂-บิ-พีเอ็มเอ็มเอ₅₀₈ โดยอิมัลชันไอทีพี และซีอาร์พี

เติมน้ำปราศจากไอออนที่มีพีเอช 4 ลงในขวดก้นกลมพร้อมปิดด้วยจุกยางซิลิโคน ก่อนทำให้อยู่ในระบบสุญญากาศโดยใช้ปั๊มดูดสลับกับการเป่าแก๊สไนโตรเจนประมาณ 5 รอบ จากนั้นทำการฉีดสารโยกย้ายสายโซ่หมากาค P(MTMA)₁₂-I ลงไปในขวดก้นกลม และจากนั้นฉีดมอนอเมอร์เมทิลเมทาคริเลตลงไป เขย่าเพื่อให้สารผสมทั้งหมดเข้ากัน นำขวดก้นกลมไปแช่ในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา

การปั่น 500 รอบต่อนาที เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ทำการฉีดตัวริเริ่มปฏิกิริยา 2, 2'-อะโซบิส (ไอโซบิวทิล อะมิโน) ไดไฮโดรคลอไรด์ (ละลายด้วยน้ำ pH~4) เพื่อเริ่มการสังเคราะห์ โดยจะทำการสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ กลไกการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1 ในกรณีของอิมัลชันซีอาร์พี จะมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับอิมัลชัน ไอทีพี เพียงแต่จะทำการเติม MTMA ลงไปแทนสารโยกย้ายสายโซ่หมากาค P(MTMA)₁₂-I โดยทำการศึกษานาฬิกาของอนุภาคและวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta Potential) โดยใช้เทคนิค DLS และศึกษาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค NMR



รูปที่ 1 การสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ไอทีพี

3. การศึกษาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของสารโยกย้ายสายโซ่และอนุภาคพอลิเมอร์

3.1 การหาเปอร์เซ็นต์ที่มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (% Conversion)

สำหรับการหาเปอร์เซ็นต์ที่มอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ของการสังเคราะห์สารโยกย้ายสายโซ่หมากาคและอนุภาคพอลิเมอร์ได้โดยทำการชั่งสารละลายและอิมัลชันของพอลิเมอร์ลงในถ้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำหรือตัวทำละลาย จนน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เหลืออยู่คงที่ บันทึกน้ำหนักพอลิเมอร์ที่เหลืออยู่หลังการอบ แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สมการ 1

$$\% \text{ Conversion} = \frac{W_p \times 100}{W_{\text{Sor}} W_E \times [M]} \quad (1)$$

เมื่อ W_p คือ น้ำหนัก (g) ของพอลิเมอร์หลังจากการอบ

W_s คือ น้ำหนัก (g) ของสารละลายหลังจากการสังเคราะห์ ที่ชั่งก่อนอบ

W_E คือ น้ำหนัก (g) ของอิมัลชันหลังจากการสังเคราะห์ ที่ชั่งก่อนอบ

$[M]$ คือ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (%wt) ก่อนการสังเคราะห์

3.2 ศึกษาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโทรสโคปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy; NMR, JNM-ECZR500, JEOL. Ltd., Japan)

ทำการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโทรสโคปี โดยนำตัวอย่างสารละลายอิมัลชันมาละลายในดีวเทอเรียม คลอโรฟอร์ม ให้ตัวอย่างมีความ

เข้มข้นประมาณ 0.1 โมลาร์ นำไปบรรจุในหลอดแก้วขนาด 17.5 ซม. X 5 มม. ที่มีจุกลพลาสติกปิดไว้อย่างหนาแน่น และที่สำคัญ ระดับของตัวอย่างในหลอดต้องมีความสูงประมาณ 4 ซม. แล้วนำไปวัดในระบบโดยเทียบสัญญาณกับสารมาตรฐาน คือ เตตระเมทิลไซเลน จากนั้นทำการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล จากกราฟสเปกตร้า $^1\text{H-NMR}$ ที่เวลาต่าง ๆ ของอนุภาคพอลิเมอร์ $\text{PMTMA}_{12}\text{-}b\text{-PMMA}_{508}$ โดยการหาค่า Degree of Polymerization จากความสัมพันธ์ระหว่างฟิสิกโปรตอนของ CH_2 ในสารโพลิเมอร์สายโซ่ กับฟิสิกโปรตอนของ CH_3 ในพอลิเมอร์แสดงดังสมการที่ 2 และ 3

$$DP_x = \frac{I_x \times DP_y \times N_{H,y}}{I_y \times N_{H,x}} \quad (2)$$

$$M_n = (DP_x \times M_0) + M_c \quad (3)$$

โดยที่

I_x และ $N_{H,x}$ คือ พื้นที่ใต้กราฟและจำนวนโปรตอนตามลำดับ ของ x (ไม่ทราบ DP)

I_y และ $N_{H,y}$ คือ พื้นที่ใต้กราฟและจำนวนโปรตอนตามลำดับ ของ y (ทราบ DP)

DP_x และ DP_y คือ ความยาวสายโซ่ของ x และ y ตามลำดับ

M_0 คือ น้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์

M_c คือ น้ำหนักโมเลกุลรวมของสารที่ทราบ DP

โดยน้ำหนักโมเลกุลทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 ดังต่อไปนี้

$$M_{n,th} = MW_{\text{macro-CTA}} \left(\frac{[M]_0 \cdot MW_M \cdot \alpha}{[M]_0 + [M]_0 \cdot \alpha} \right) \quad (4)$$

โดย α คือ conversion ของพอลิเมอร์

MW_M และ $MW_{\text{macro-CTA}}$ คือ น้ำหนักโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลต และ $\text{PMTMA}_{12}\text{-I}$ ตามลำดับ

$[M]_0$ และ $[M]_{\text{macro-CTA}}_0$ คือ จำนวนโมลเริ่มต้นของเมทิล เมทาคริเลต และ $\text{PMTMA}_{12}\text{-I}$ ตามลำดับ

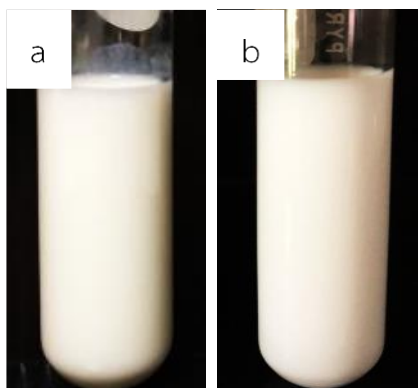
3.3 การวัดขนาดอนุภาคและค่าความเป็นประจุที่ผิว

วัดขนาดของอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวนและขนาดของอนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตรด้วยเครื่องวัดการกระเจิงแสง โดยการนำเอาอิมัลชันของอนุภาคพอลิเมอร์ 2-3 หยด กระจายตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในเซลล์วัดตัวอย่าง ¾ ส่วน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DLS ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนค่าความเป็นประจุที่ผิวถูกวัดด้วยเทคนิค Zeta Potential

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ P(MMA-co-MTMA) ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี และอนุภาค $\text{PMTMA}_{12}\text{-}b\text{-PMMA}_{508}$ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบ อิมัลชัน ไอทีพี โดยใช้ $\text{P(MTMA)}_{12}\text{-I}$ เป็นสารโพลิเมอร์สายโซ่หลัก จากผลการทดลอง พบว่า สารละลายอิมัลชันทั้งสองชนิดที่ได้มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นใส (รูปที่ 2) เมื่อทำการวัดขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองเทคนิค (แสดงดังรูปที่ 3) พบว่า อนุภาคพอลิเมอร์ $\text{PMTMA}_{12}\text{-}b\text{-PMMA}_{508}$ ที่เตรียมผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ไอทีพี จะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวนและเฉลี่ยโดยปริมาตร เท่ากับ 227 และ 250 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งเล็กกว่าขนาดของอนุภาค P(MMA-co-MTMA) ที่เตรียมผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวนและเฉลี่ยโดยปริมาตร เท่ากับ 232 และ 282 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle distribution; d_w/d_n) โดยที่หากค่าดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าอนุภาคมีขนาดเท่ากัน ซึ่งพบว่าอนุภาคพอลิเมอร์ $\text{PMTMA}_{12}\text{-}b\text{-PMMA}_{508}$ ที่เตรียมโดยอิมัลชัน ไอทีพี มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ($d_w/d_n = 1.11$) ที่แคบ

กว่า (เข้าใกล้ 1 มากกว่า) ของอนุภาคพอลิเมอร์ P(MMA-co-MTMA) ($d_v/d_n = 1.22$) ที่เตรียมโดยอิมัลชัน ซีอาร์พี



รูปที่ 2 ภาพอิมัลชันของ (a) P(MMA-co-MTMA) ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ซีอาร์พี และ (b) PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈ ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพี

ผลการทดลองเหล่านี้ อาจเนื่องมาจากอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพี ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการควบคุมมวลโมเลกุล อาจทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยาวใกล้เคียงกันมากกว่าในกรณีของอิมัลชัน ซีอาร์พี ดังนั้นในระหว่างการประกอบตัวเองเป็นอนุภาคพอลิเมอร์จึงมีการประกอบกันอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกันมากกว่า นอกจากนี้การที่ขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพีมีขนาดเล็กกว่าการเตรียมด้วยอิมัลชัน ซีอาร์พี อาจเนื่องมาจากอนุภาคพอลิเมอร์มีการสังเคราะห์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ ที่ซึ่งมีการแบ่งแยกบล็อกของส่วนที่มีขั้ว (PMTMA) และส่วนไม่มีขั้ว (PMMA) อย่างชัดเจน ทำให้ประจุบวกของบล็อก PMTMA สามารถทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ในขณะที่กรณีของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วย อิมัลชัน ซีอาร์พี พอลิเมอร์มีการเชื่อมต่อสายโซ่แบบสุ่มทำให้ส่วนที่มีขั้วบางส่วนอยู่ภายในอนุภาค ความเสถียรของอนุภาคจึงต่ำกว่าแบบอิมัลชัน ไอทีพี ดังนั้นในระหว่างการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์จึงรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลด

พื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำ เพื่อให้อนุภาคมีความเสถียรมากขึ้น สมมุติฐานดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวัดประจุผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากทั้งสองเทคนิคดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมีค่าเป็นบวกและมากกว่า +30 mV แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพอลิเมอร์จากทั้งสองเทคนิคมีความเสถียรทางคอลลอยด์ ไม่มีการเกาะตัวกันดังรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามพบว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพี มีค่าศักย์ซีต้ามากกว่า +54 mV ตลอดการสังเคราะห์ และมีค่าสูงกว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากอิมัลชัน ซีอาร์พี (39-43 mV)

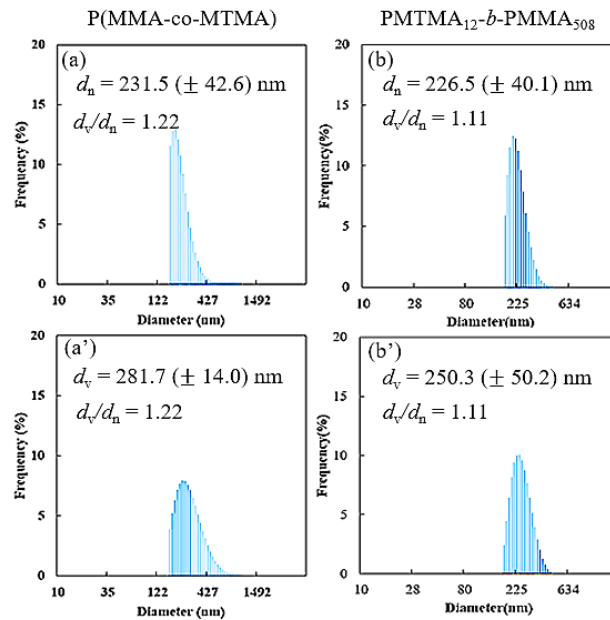
ตารางที่ 1 ค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการสังเคราะห์แบบ อิมัลชัน ซีอาร์พี และอิมัลชัน ไอทีพี กระจายตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (ชม.)	ค่าศักย์ซีต้า (มิลลิโวลต์)	
	อิมัลชัน ซีอาร์พี	อิมัลชัน ไอทีพี
	P(MMA-co-MTMA)	PMTMA ₁₂ -b-PMMA ₅₀₈
1	+42.58	+54.18
2	+43.42	+63.31
3	+40.96	+63.81
4	+41.09	+68.64
14	+41.66	+66.01
24	+39.65	+59.86

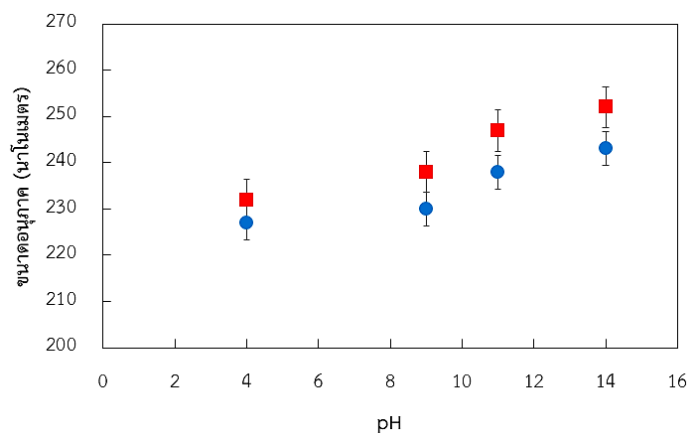
เนื่องจากอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้อาจมีการนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในบางผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพเบสสูงและมีสภาพความแรงไอออน (Ionic Strength) สูง ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบความเสถียรทางคอลลอยด์ในเทอมของขนาดอนุภาคที่สภาวะดังกล่าว และเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากทั้งสองเทคนิค โดยในกรณีการปรับเปลี่ยน pH พบว่าขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามสภาพเบสที่สูงขึ้นทั้งสองสภาวะการสังเคราะห์ (แสดงดังรูปที่ 4) เนื่องจากที่สภาพเบสที่เพิ่มสูงขึ้น อนุภาคพอลิเมอร์จะมีความเสถียรทางคอลลอยด์ลดลง ทำให้อนุภาคเกิดการ

รวมตัวกัน อนุภาคพอลิเมอร์จึงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อเทียบขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สภาวะ pH 14 กับขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ก่อนปรับค่า pH ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี จะเพิ่มขึ้น (เพิ่มขึ้น 8.62 %) มากกว่า

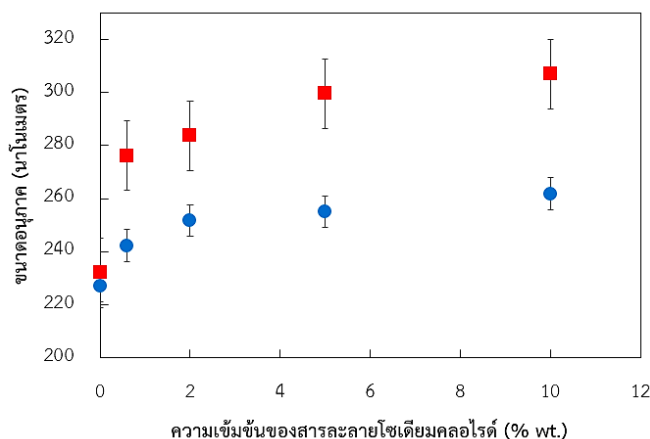
ขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ (เพิ่มขึ้น 7.05 %) ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพี แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ไอทีพี มีความเสถียรทางคอลลอยด์และทนต่อสภาพเบสได้ดีกว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยอิมัลชัน ซีอาร์พี



รูปที่ 3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยจำนวน (d_n) (a และ b) และเฉลี่ยโดยปริมาตร (d_v) (a' และ b') ของอนุภาค P(MMA-co-MTMA) (a และ a') ที่เตรียมผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี และอนุภาคพอลิเมอร์ PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈ (b และ b') ที่เตรียมผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ไอทีพี ที่เวลา 24 ชั่วโมง กระจายตัวในน้ำ (pH~4) ด้วยเครื่อง DLS



รูปที่ 4 กราฟขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี (สีเหลี่ยม) และ ไอทีพี (วงกลม) ที่ค่า pH ต่าง ๆ และเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 กราฟขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ซีอาร์พี (สีเหลี่ยม) และ ไอทีพี (วงกลม) ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ ที่ pH~4 และเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง

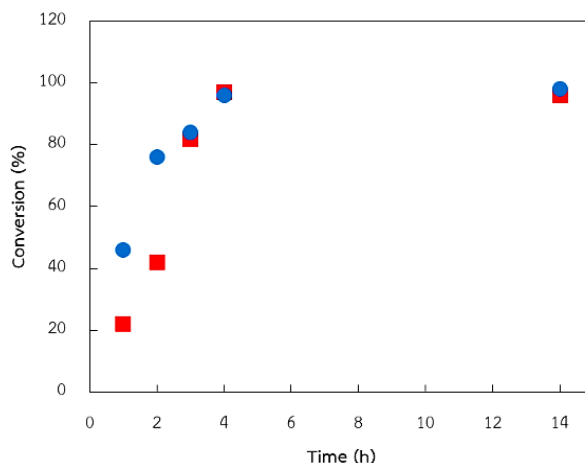
ในขณะที่เมื่อทำการปรับสภาพของความแรงไอออนต่าง ๆ โดยการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.6 2.5 และ 10 %wt. พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น (แสดงดังรูปที่ 5) โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 10 %wt. ขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากทั้งสองเทคนิคจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อคิดหาเปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเทียบกับการไม่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ซีอาร์พี และไอทีพีมีค่า เท่ากับ 32.61 และ 15.58 % ตามลำดับ โดยอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ซีอาร์พีจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นมากกว่าแบบอิมัลชัน ไอทีพี เช่นเดียวกับผลของสภาพเบส แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเทคนิคอิมัลชัน ไอทีพี มีความเสถียรสูงกว่าแบบอิมัลชัน ซีอาร์พี ทั้งในสภาพที่เป็นเบสและความแรงไอออนสูง

ในการที่จะนำเทคนิคการสังเคราะห์ไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม อัตราการสังเคราะห์พอลิเมอร์หรือเวลาในการสังเคราะห์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นอุปสรรคในการนำเทคนิคการสังเคราะห์แบบคอลโทรล/ลิฟวิ่งไปใช้งาน เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวนี้ใช้เวลาในการสังเคราะห์

ค่อนข้างนานมากเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์โดยกลไกอนุมูลอิสระทั่วไป อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (15) พบว่าอิมัลชัน ไอทีพี ใช้เวลาในการสังเคราะห์ค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับเทคนิคการสังเคราะห์แบบคอลโทรล/ลิฟวิ่งอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากความเร็วของวัฏจักรสารโยกย้ายสายโซ่ ค่อนข้างต่ำ (ควบคุมการกระจายตัวของมวลโมเลกุลได้ไม่ดีเท่ากับเทคนิคอื่น ๆ) ทำให้มีอัตราในการเกิดพอลิเมอร์เชนที่ค่อนข้างเร็ว ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมีอัตราการสังเคราะห์ใกล้เคียงกับการสังเคราะห์แบบอิมัลชันทั่วไป ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกราฟการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ (% Conversion) ที่เวลาต่าง ๆ ของอนุภาคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยอิมัลชัน ไอทีพีและอิมัลชัน ซีอาร์พี (นิยมในอุตสาหกรรม) แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นได้ว่าทั้งสองเทคนิคมีอัตราการสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน (มีความชันของกราฟใกล้เคียงกัน) และเข้าใกล้ 100 % การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ ภายในเวลานที่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอิมัลชัน ไอทีพี สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ ใช้เวลาไม่แตกต่างจากเทคนิคการสังเคราะห์แบบดั้งเดิม นอกจากนี้ตามที่ได้อภิปรายผลไปแล้ว อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จาก

อิมัลชัน ไอทีพี ไม่เพียงแต่มีขนาดที่เล็กกว่าและมีความเสถียรมากกว่าแล้ว ยังอาจรวมไปถึงการกระจายตัวของ

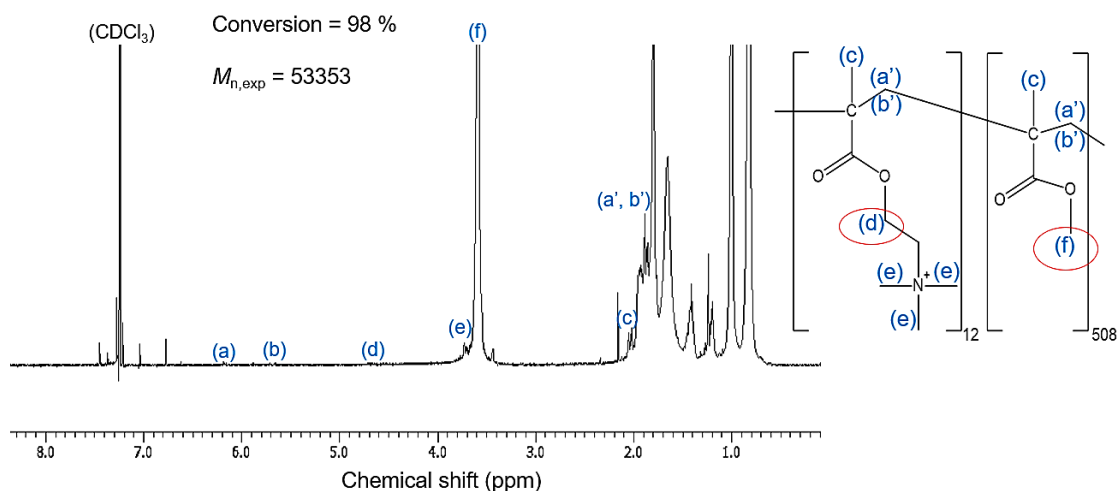
มวลโมเลกุลที่สม่ำเสมอเนื่องจากเตรียมด้วยกลไกการสังเคราะห์แบบคอนโทรล/ลิฟวิ่ง



รูปที่ 6 กราฟ % การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่เวลาต่าง ๆ ในการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยอิมัลชัน ซีอาร์พี (สี่เหลี่ยม) และอิมัลชัน ไอทีพี (วงกลม) ที่ pH~4 และเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง

ข้อมูลหนึ่งที่จะบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะของกลไกการสังเคราะห์แบบคอนโทรล/ลิฟวิ่ง คือ มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตาม % การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และมวลโมเลกุลจะใกล้เคียงกับมวลโมเลกุลทางทฤษฎี โดยในงานวิจัยนี้จะหามวลโมเลกุลด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโทรสโกปี ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของโปรตอนของ $-CH_2-$ (พีค d) ในหน่วยซ้ำของ PMTMA

กับพื้นที่ใต้พีคของโปรตอนของ $-CH_3$ (พีค f) ในหน่วยซ้ำของ PMMA ดังรูปที่ 7 และคำนวณตามสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ข้อมูลมวลโมเลกุลที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่ามวลโมเลกุลที่ได้เพิ่มขึ้นตาม % การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์และใกล้เคียงกับมวลโมเลกุลทางทฤษฎี แสดงให้เห็นว่าเทคนิคอิมัลชัน ไอทีพีมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมการกระจายตัวของมวลโมเลกุล



รูปที่ 7 $^1\text{H-NMR}$ ของอนุภาคพอลิเมอร์ $\text{PMTMA}_{12}\text{-}b\text{-PMMA}_{508}$ ที่เตรียมจากอิมัลชัน ไอทีพี ที่เวลาการสังเคราะห์ 14 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 น้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคพอลิเมอร์ PMTMA₁₂-b-PMMA₅₀₈ ที่เตรียมจากกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ไอทีพี ที่ % การเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ต่าง ๆ

อนุภาค	เวลา (ชั่วโมง)	Conversion (%)	$M_{n,th}$ (g/mol)	M_n (g/mol)
PMTMA ₁₂ -b-PMMA ₅₀₈ (อิมัลชัน ไอทีพี)	2	76	32,485	47,246
	4	96	40,575	52,552
	14	98	41,384	53,353

สรุปผล

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า อนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ไอทีพี มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า และมีค่า Zeta Potential ที่มากกว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกระบวนการสังเคราะห์แบบ อิมัลชัน ซีอาร์พี เมื่อนำอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากทั้งสองเทคนิคไปศึกษาความเสถียรที่สภาวะที่มีสภาพเบสสูงและสภาพความแรงของไอออนสูง พบว่าอนุภาคพอลิเมอร์ที่เตรียมจากอิมัลชัน ไอทีพี มีความเสถียรมากกว่าแบบอิมัลชัน ซีอาร์พี นอกจากนี้เทคนิคอิมัลชัน ไอทีพี มีอัตราในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ค่อนข้างเร็วและไม่แตกต่างจากอิมัลชัน อาร์ซีพี ในขณะที่ยังมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคพอลิเมอร์ ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าอิมัลชัน ไอทีพี มีประสิทธิภาพในการเตรียมอนุภาคพอลิเมอร์สูงกว่าอิมัลชัน ซีอาร์พี และสามารถพัฒนาต่อยอดนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) (TRF; No. MSD601I0086) และบริษัท เคมีออยล์ จำกัด และขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Bourgeat-Lami E, Tissot I, Lefebvre F. Synthesis and Characterization of SiOH-Functionalized Polymer Latexes Using Methacryloxy Propyl Trimethoxysilane in Emulsion Polymerization. *Macromolecules*. 2002;35(16):6185-91.
2. Litt MH, Hsieh BR, Krieger IM, Chen TT, Lu HL. Low surface energy polymers and surface-active block polymers: II. Rigid microporous foams by emulsion polymerization. *J Colloid Interface Sci*. 1987;115(2):312-29.
3. Mock EB, De Bruyn H, Hawket BS, Gilbert RG, Zukoski CF. Synthesis of Anisotropic Nanoparticles by Seeded Emulsion Polymerization. *Langmuir*. 2006;22(9):4037-43.
4. Chern C-S. Principles and Applications of Emulsion Polymerization. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2008.

5. Peter A. Lovell, Mohamed S. El-Aasser. Emulsion Polymerization and Emulsion Polymers. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd; 1997.
6. อมร ไชยสัตย์. บทบาทของสารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน. Burapha Sci J. 2013;18(1):240-8.
7. Thickett S. Emulsion polymerization: State of the art in kinetics and mechanisms. Polymer. 2007;48:6965-91.
8. Reynolds WB. Emulsion polymerization. J Chem Educ. 1949;26(3):135.
9. Gilbert RG. Emulsion Polymerization: A Mechanistic Approach. London: Academic press; 1995.
10. Ferguson CJ, Hughes RJ, Pham BTT, Hawket BS, Gilbert RG, Serelis AK, et al. Effective ab Initio Emulsion Polymerization under RAFT Control. Macromolecules. 2002;35(25):9243-5.
11. Ferguson CJ, Hughes RJ, Nguyen D, Pham BTT, Gilbert RG, Serelis AK, et al. Ab Initio Emulsion Polymerization by RAFT-Controlled Self-Assembly. Macromolecules. 2005;38(6):2191-204.
12. Chiefari J, Chong YK, Ercole F, Krstina J, Jeffery J, Le TPT, et al. Living Free-Radical Polymerization by Reversible Addition–Fragmentation Chain Transfer: The RAFT Process. Macromolecules. 1998;31(16):5559-62.
13. Karagoz B, Esser L, Duong HT, Basuki JS, Boyer C, Davis TP. Polymerization-Induced Self-Assembly (PISA) – control over the morphology of nanoparticles for drug delivery applications. Polym Chem. 2014;5(2):350-5.
14. Warren NJ, Armes SP. Polymerization-Induced Self-Assembly of Block Copolymer Nano-objects via RAFT Aqueous Dispersion Polymerization. J Am Chem Soc. 2014;136(29):10174-85.
15. Sue-eng S, Boonchuwong T, Chaiyasat P, Okubo M, Chaiyasat A. Preparation of stable poly(methacrylic acid)-b-polystyrene emulsion by emulsifier-free emulsion iodine transfer polymerization (emulsion ITP) with self-assembly nucleation. Polymer. 2017;110:124-30.



การใช้อินูลินทดแทนน้ำตาลทรายในไอศกรีมนมเสริมอกไก่

The Using of Inulin Replaced with Sugar in Milk Ice Cream Supplemented with Chicken Breast

จิราภัทร โอทอง^{1*}, ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์¹ และ อมรรัตน์ เจริญชัย²

Jirapat Othong^{1*}, Laddawan Klinmalai¹ and Amornrat Chareonchai²

¹สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร 10300

²ข้าราชการบำนาญ อาจารย์ประจำหลักสูตรคหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10300

¹Department of Food and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300, THAILAND

²Pensioner of Master of Home Economics, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300, THAILAND

*Corresponding author e-mail: toonkoon04@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 6 March, 2020

Revised: 21 April, 2020

Accepted: 17 May, 2020

Available online: 28 May, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.4

Keywords: milk ice cream, chicken breast, inulin

This research continued from the previous research which was the development milk ice cream supplemented with 10% chicken breast. The previous research would like to add and extra amount of protein from chicken breast in milk ice cream to create the new high protein ice cream for exercise and healthcare concerned consumer. The aim of research was to reduce total energy from carbohydrate in chicken breast milk ice cream by using inulin replaced with sugar. Inulin were used as sugar replacers. Different combinations of replacement levels were investigated: 25, 50 and 75 % by weight. Ice cream were studied in terms of physical properties, sensory properties, proximate composition and total energy valued. The research showed that the replacement 50 % of inulin was suitable for ice cream. The viscosity, overrun, texture and melting rate of the developed formula were 147 cps, 41 %, 11,780 g force and 6 %, respectively. The lightness (L*), redness

(a*) and yellowness (b*) value were 88.68, 4.60 and 19.11, respectively. Regarding the sensory analysis, showed that the consumers acceptance score were not significantly ($p > 0.05$), that was medium-liking. The proximate compositions, moisture and protein content of the chicken breast ice cream with 50 % of inulin were 68.03 and 11.79 %, that was higher than basic ice cream. Fat and ash content of the chicken breast ice cream with 50 % of inulin were 6.02 and 0.45 %, that was lower than basic ice cream. In addition total energy of chicken breast milk ice cream with 50 % of inulin was reduced in 32.79 %, that was lower than basic ice cream.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ต่อยอดจากการพัฒนาไอศกรีมเสริมอกไก่ที่เสริมอกไก่ในระดับร้อยละ 10 เพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนให้แก่ไอศกรีมสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ออกกำลังกายและกลุ่มที่รักสุขภาพ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อพัฒนาไอศกรีมเสริมอกไก่ให้มีพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตลดลง โดยใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลที่ระดับร้อยละ 25 50 และ 75 นำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ ความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส องค์ประกอบทางเคมี และค่าพลังงานของไอศกรีม จากการศึกษาพบว่าไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่ใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 50 เป็นระดับที่ให้คุณภาพทางกายภาพและความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีที่สุด โดยน้ำไอศกรีมมีค่าความหนืด 147 cps ค่าโอเวอร์รันร้อยละ 41 ค่าเนื้อสัมผัส 11,780 g force และอัตราการละลายร้อยละ 6 ส่วนค่าสีพบว่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีค่า 88.68 4.60, 19.11 ตามลำดับ เมื่อทดสอบความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ไอศกรีมนมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ร้อยละ 50 ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบที่ไม่แตกต่างจากไอศกรีมสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลาง ส่วนองค์ประกอบทางเคมีพบว่าไอศกรีมนมที่พัฒนามีปริมาณความชื้นและโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ

ไอศกรีมสูตรพื้นฐาน คือ ร้อยละ 68.03 และ 11.79 ตามลำดับ ส่วนปริมาณไขมันและเถ้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม คือ ร้อยละ 6.02 และ 0.45 ตามลำดับ นอกจากนี้ไอศกรีมนมที่พัฒนามีพลังงานลดลงร้อยละ 32.79 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม

คำสำคัญ: ไอศกรีมนม อกไก่ อินนูลิน

บทนำ

โรคไม่ติดต่อเรื้อรังเป็นสาเหตุสำคัญในการเสียชีวิตเป็นอันดับต้น ๆ ของประชากรทั่วโลก ซึ่งจำนวนผู้ป่วยและผู้เสียชีวิตจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ด้วยเหตุนี้ผู้บริโภคจึงเริ่มเกิดความตระหนักถึงความเสี่ยงที่จะเกิดโรคและหันมาใส่ใจในสุขภาพเพิ่มมากขึ้น โดยหันมาออกกำลังกายและรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งผู้ออกกำลังกายส่วนใ้มักนิยมรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพที่มีปริมาณไขมันและปริมาณน้ำตาลต่ำ แต่มีปริมาณของโปรตีนสูง เพื่อช่วยในการสร้างกล้ามเนื้อและหลีกเลี่ยงการบริโภคของหวานในทุกรูปแบบ

ไอศกรีมเป็นของหวานที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วโลกมาเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเขตร้อนอย่างประเทศไทย ตลาดไอศกรีมในประเทศไทยพบว่าในปี พ.ศ.2561 มีมูลค่าอยู่ที่ 15,958.4 ล้านบาท เติบโตขึ้นร้อยละ 7.2 จากปี พ.ศ. 2560 (1) แสดงให้เห็นว่าธุรกิจด้านไอศกรีมในประเทศไทย ยัง

สามารถเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามแนวโน้มการดูแลสุขภาพที่เพิ่มขึ้นมาก ส่งผลให้ผู้บริโภคเริ่มให้ความสำคัญกับการเลือกบริโภคอาหารมากกว่าแต่ก่อน ซึ่งส่วนใหญ่โอศกริมมีทั้งพลังงาน ไขมัน และน้ำตาลในปริมาณที่สูง อาจมีผลทำให้ผู้บริโภคเกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังได้ ธุรกิจโอศกริมจึงมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านรสชาติ เนื้อสัมผัสที่หลากหลาย ด้านสุขภาพช่วยลดปริมาณไขมันและปริมาณน้ำตาลลง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค แต่เนื่องจากการผลิตโอศกริมนั้นมีวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบหลักคือน้ำตาลและวิปครีม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ให้พลังงานและไขมันในปริมาณสูง จึงมีการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล อีกทั้งยังช่วยลดระดับไขมันได้อีกด้วย เพื่อให้โอศกริมเป็นของหวานสำหรับผู้บริโภคที่รักสุขภาพอย่างแท้จริง ซึ่งสารชนิดนี้คือ อินนูลิน

อินนูลิน (Inulin) เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งในกลุ่มพรุกแทนประกอบด้วยน้ำตาลฟรักโทสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว จำนวน 2 ถึง 60 หน่วย (DP 2-60) ด้วยพันธะ β -(2-1) ทำให้ อินนูลินไม่สามารถถูกย่อยได้ในร่างกายมนุษย์ และมีคุณสมบัติคล้ายใยอาหารที่ละลายน้ำได้จึงช่วยในการขับถ่าย อินนูลินมีค่าดัชนีน้ำตาลในอาหาร (Glycemic Index) ต่ำจึงช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด (2) นอกจากนี้มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกอาหารของแบคทีเรียที่มีประโยชน์อยู่ในลำไส้ใหญ่มนุษย์ ทำให้แบคทีเรียเหล่านี้เพิ่มจำนวนมากขึ้น จึงช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค และช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกันให้แก่ร่างกาย อินนูลินเป็นเส้นใยอาหารที่พืชเก็บสะสมไว้ พบได้ในพืช ผัก และผลไม้หลายชนิด พบมากในหัวกระเทียม หอมหัวใหญ่ หน่อไม้ฝรั่ง กล้วย ดอกอาร์ติโชค แก่นตะวัน และหัวชิคอรี่ (Chicory) เป็นต้น (3)

เห็นได้ว่าการเสริมอวกในโอศกริมนั้น ช่วยให้อุณหภูมิโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่ยังมีคาร์โบไฮเดรต และไขมันสูงจากน้ำตาลและวิปครีมที่เป็นส่วนผสม ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทราย เพื่อพัฒนา

โอศกริมนมเสริมอวกให้มีพลังงานลดลง ทำให้อุณหภูมิเสริมอวกเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่มีปริมาณโปรตีนสูงและมีพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มปริมาณโปรตีนและใยอาหารให้แก่โอศกริมอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

ตัวรับการศึกษาปริมาณอินนูลินที่เหมาะสมสำหรับทดแทนน้ำตาลในโอศกริมนมเสริมอวก

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่พัฒนาต่อจากโอศกริมนมเสริมอวก โดยใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายในโอศกริม เพื่อลดพลังงานให้แก่โอศกริม และใช้อุณหภูมิเสริมอวกเป็นตัวแปรควบคุม ส่วนผสมที่ใช้ในโอศกริมมีดังนี้ นมสดพาสเจอร์ไรส์ 445 กรัม วิปครีม 230 กรัม น้ำตาลทราย 57 กรัม ไข่แดง 50 กรัม กลั่นวนิลา 3 กรัม และอวก 78.5 กรัม และใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 25 50 และ 75 ของน้ำหนักน้ำตาลทราย

ขั้นตอนการเตรียมอวก

อวกสำหรับใส่ในโอศกริมมีวิธีการเตรียมดังนี้ ล้างอวกให้สะอาด ลอกเอาหนังและไขมันออกจนหมด หั่นอวกเป็นชิ้นเล็ก ต้มอวกในน้ำเดือดที่ใส่น้ำส้มสายชูและเกลือ ใช้เวลาต้ม 15 นาที ตักอวกขึ้นจากน้ำ และนำไปใส่ในน้ำเย็น เมื่ออวกเย็นตักพักไว้ในกระชอนเพื่อให้สะเด็ดน้ำนำอวกไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด ล้างอวกที่บดละเอียดด้วยน้ำเปล่า และขย้าน้ำสีขาวซึ่งเป็นส่วนที่มีกลิ่นคาวออก กรองด้วยผ้าขาวบางหนา 4 ชั้น เพื่อเอาน้ำสีขาวทิ้ง จากนั้นนำอวกไปล้างน้ำ และเทน้ำสีขาวทิ้งอีก 3 ครั้ง หรือจนน้ำเปลี่ยนจากสีขาวเป็นใส เมื่อล้างจนหมดน้ำสีขาวแล้ว ให้บีบอวกจนน้ำหมดจากอวก นำอวกที่ได้ใส่ถุงบรรจุสุญญากาศ เข้าเครื่องบรรจุสุญญากาศ จากนั้นห่อด้วยกระดาษฟอยล์ นำเก็บเข้าตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -20 ถึง -25 องศาเซลเซียส สำหรับใช้งานในลำดับต่อไป โดยอวกที่เตรียมไว้สามารถเก็บรักษาได้ไม่เกิน 1 เดือน

ขั้นตอนการทำไอศกรีม

ซึ่งส่วนผสมตามสูตร จากนั้นเทนมใส่หม้อ ตั้งไฟกลาง ต้มจนพอเดือด พักไว้ให้เย็น และนำน้ำเปล่าใส่หม้อตั้งไฟให้เดือด ระหว่างรอน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นตีไข่แดง น้ำตาล และอินนูลิน ด้วยตะกร้อมือในอ่างผสมเป็นเวลา 3 นาที ให้ส่วนผสมขึ้นฟูเล็กน้อย จากนั้นใส่ส่วนผสมที่พักไว้ คนให้เข้ากัน ยกขึ้นตุนบนหม้อน้ำเดือด คนด้วยพายไม้ตลอดเป็นเวลา 10 นาที จนส่วนผสมเนื้อเนียน พักไว้ให้เย็น ใส่วิปครีมและกลิ่นวานิลาลงไป คนให้เข้ากัน นำออกใส่ลงในส่วนผสมไอศกรีมปั่นด้วยความเร็วสูงสุด เป็นเวลา 20 วินาที จนครบ 3 นาที นำไปปั่นในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำเข้าเครื่องปั่นไอศกรีม ปั่นจนอุณหภูมิลดลงถึง -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที เมื่อปั่นไอศกรีมเสร็จ บรรจุใส่ภาชนะนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 ถึง -25 องศาเซลเซียส

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของไอศกรีม

1. การวัดค่าสีของไอศกรีม

วัดค่าสีโดยตักไอศกรีมลงในปริมาณ 2 ใน 3 ของถ้วยวัดสี จากนั้นวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี Hunter Lab และวัดค่าสีออกมาในค่า L^* , a^* , และ b^* ทำ 3 ซ้ำ

2. การวัดค่าความข้นหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์

นำตัวอย่างน้ำไอศกรีมมิกซ์ที่ผ่านการบ่มแล้ว ปริมาณ 500 มิลลิลิตร มาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส โดยใช้หัววัดเบอร์ 01 และความเร็วรอบที่ 50 rpm ดัดแปลงจาก (4)

3. การวัดค่าโอเวอร์รัน (Overrun)

วัดค่าโอเวอร์รันของไอศกรีม โดยชั่งน้ำหนักน้ำไอศกรีมมิกซ์ก่อนปั่นและไอศกรีมที่ปั่นจนแข็งตัวแล้ว จากนั้นนำไปคำนวณค่าโอเวอร์รันตามสูตร (4)

$$\text{ค่าโอเวอร์รัน (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักไอศกรีมมิกซ์} - \text{น้ำหนักไอศกรีม})}{\text{น้ำหนักไอศกรีม}} \times 100$$

4. การวัดอัตราการละลาย

วัดอัตราการละลาย โดยชั่งตัวอย่างไอศกรีม 50 กรัม วางบนตะแกรงร่อนแบ่งขนาด 80 เมช ที่มีถ้วยแอสตันเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว รองรับน้ำไอศกรีมอยู่ด้านล่าง วางไอศกรีมทิ้งไว้ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักของน้ำไอศกรีมที่ละลายทุก ๆ 10 นาที จนครบ 60 นาที จากนั้นนำไปคำนวณค่าร้อยละการละลาย และสร้างกราฟอัตราการละลาย ดัดแปลงจาก (4)

$$\text{อัตราการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักของไอศกรีมที่ละลาย}}{\text{น้ำหนักของไอศกรีมเริ่มต้น}} \times 100$$

5. การวัดค่าเนื้อสัมผัส

วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ใช้ตัวอย่างไอศกรีมบรรจุถ้วยวัดค่าความแข็งด้วยเครื่อง Texture Analyzer สภาวะในการทดสอบมีดังนี้

- 1) หัว probe P/36R
- 2) Pre-test speed 1 mm/s
- 3) Test speed 2 mm/s
- 4) Post-test speed 2 mm/s
- 5) Distance 10 mm

การศึกษาคูณภาพทางเคมีของไอศกรีม

นำไอศกรีมมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรต และเส้นใย เปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรพื้นฐาน (5)

การประเมินความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำไอศกรีมเสริมอกไก่ และไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายทั้ง 3 ระดับ มาประเมินความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design, RCBD ประเมินความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น (นม) รสชาติ (หวาน) เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ใช้

ผู้บริโภคนักศึกษาที่เป็นนักกีฬา คณะเทคโนโลยี
คหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
พระนคร จำนวน 80 คน

ค่าพลังงานของไอศกรีม

ค่าพลังงานของไอศกรีมสามารถคำนวณได้ โดย
นำปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จากผลการ
วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีมาใช้ในการคำนวณ โดยโปรตีน
1 กรัม ให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรต 1 กรัม
ให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี และไขมัน 1 กรัมให้พลังงาน
9 กิโลแคลอรี

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้แผนการทดลอง
แบบ CRD (Completely Randomized Design), RCBD
(Randomized Complete Block Design) และ t - test
for dependent Samples วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน
(Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของ
ค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์โดยวิธี Duncan's Multiple
Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของไอศกรีม

1. ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์

นำน้ำไอศกรีมมิกซ์ที่บ่มนาน 24 ชั่วโมง มาวัด
ค่าความหนืดเพื่อศึกษาผลของปริมาณอินนูลินต่อค่าความ
หนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์

ตัวอย่าง	ค่าความหนืด (cps)
ควบคุม	188.50 ^a ±0.77
อินนูลินร้อยละ 25	84.70 ^d ±0.71
อินนูลินร้อยละ 50	147.07 ^c ±0.71
อินนูลินร้อยละ 75	153.50 ^b ±1.34

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความ
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าความหนืดของน้ำ
ไอศกรีมมิกซ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.05 โดยน้ำไอศกรีมมิกซ์สูตรควบคุม (ไอศกรีม
เสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) มีค่าความหนืดสูงที่สุดคือ
188.50 cps ทั้งนี้เนื่องจากอินนูลินมีความสามารถในการ
จับกับน้ำหรือดูดซับน้ำได้น้อยกว่าน้ำตาล (6) นอกจากนี้
พบว่าการเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงทำให้ค่าความ
แข็งแรงของเจลอินนูลินลดลง (7) ด้วยเหตุนี้ความหนืด
ของไอศกรีมน้ำไอศกรีมมิกซ์ที่ทดแทนด้วยอินนูลินทั้ง
3 ระดับ จึงมีค่าน้อยกว่าน้ำไอศกรีมมิกซ์สูตรควบคุม
(ไอศกรีมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน)

เมื่อเปรียบเทียบน้ำไอศกรีมมิกซ์ที่ทดแทนด้วย
อินนูลินทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นส่งผล
ให้ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์เพิ่มขึ้นด้วย โดยน้ำ
ไอศกรีมมิกซ์ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 75 มีค่า
ความหนืดสูงที่สุด คือ 153.50 cps และน้ำไอศกรีมมิกซ์
ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มีค่าความหนืดน้อย
ที่สุด คือ 84.70 cps ทั้งนี้เนื่องจากอินนูลินจะมีคุณสมบัติ
เป็นเจลเมื่อมีการใส่ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (8) ด้วยเหตุ
นี้เมื่อใส่อินนูลินลงผสมกับน้ำไอศกรีมมิกซ์อินนูลินจะดูด
ซับน้ำไว้ จึงทำให้ความหนืดของไอศกรีมเพิ่มขึ้น

2. ค่าโอเวอร์รันและลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม

นำไอศกรีมที่ปั่นแข็งและแช่ในช่องแช่แข็งนาน
24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าโอเวอร์รันและเนื้อสัมผัสเพื่อ
ศึกษาปริมาณอินนูลินต่อค่าโอเวอร์รัน และเนื้อสัมผัสของ
ไอศกรีม ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่า
โอเวอร์รันของไอศกรีมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง
สถิติที่ระดับ 0.05 โดยไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริม
อกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) มีค่าโอเวอร์รันสูงสุด คือ ร้อยละ 97
ไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มี
ค่าโอเวอร์รันน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 36 เนื่องจากการ
เตรียมน้ำไอศกรีมซึ่งมีการตุ๋นเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่
อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิที่สูงนี้
ทำให้อินนูลินเกิดการก่อเจลได้ไม่ดีเพราะอินนูลินมีการ
ละลายน้ำมากกว่าการก่อตัวเป็นเจล โดยอินนูลินจะมีการ

ละลายได้มากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งจะนำไปสู่การก่อผลึกได้ไม่ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำลงและส่งผลต่อโครงสร้างของเจลที่ไม่สมบูรณ์ (7) ทำให้น้ำไอศกรีมมีค่าความหนืดน้อยจึงส่งผลให้ฟองอากาศถูกตีผสมไปกับเนื้อไอศกรีมในปริมาณที่น้อยทำให้ไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มีค่าโอเวอร์รันน้อยที่สุด แต่เมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าโอเวอร์รันของไอศกรีมเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอินนูลินเป็นใยอาหารที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ เมื่อใส่อินนูลินลงผสมกับน้ำไอศกรีมมีกซ์อินนูลินจะดูดซับน้ำไว้ทำให้ความหนืดของไอศกรีมเพิ่มขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ฟองอากาศที่ถูกตีผสมในไอศกรีมขณะปั่นแข็งมีขนาดเล็กและมีความคงตัวที่สูงส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าโอเวอร์รันสูงขึ้นเช่นกัน (9)

จากผลค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีม (ตารางที่ 2) พบว่า ค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลิน) มีค่าเนื้อสัมผัสสูงสุดคือ 27,373 g force เนื่องจากอุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างส่งผลต่อความแข็งแรงของเจลอินนูลิน พบว่าการเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลอินนูลินลดลง (7) โดยได้ทดสอบความแข็งแรงของเจลอินนูลินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 (w/w) พบว่า เจล อินนูลินมีค่าความแข็งแรงลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเตรียมเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของเจลอินนูลินอยู่ที่ 5 N ส่วน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของเจลอินนูลินอยู่ที่ 3 N ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมเจลที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ทำให้อินนูลินเกิดการก่อเจลได้ไม่ดี เพราะ อินนูลินมีการละลายน้ำมากกว่าการก่อตัวเป็นเจล นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงอินนูลินจะมีการละลายได้มากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งจะนำไปสู่การก่อผลึกได้ไม่ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำลงและส่งผลต่อโครงสร้างของเจลที่ไม่สมบูรณ์ (7) ด้วยเหตุนี้ค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีมอวกั่ทดแทนอินนูลินทั้ง 3 ระดับ จึงมีค่าต่ำกว่าไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลิน)

เมื่อเปรียบเทียบไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลินทั้ง 3 ระดับพบว่า ปริมาณอินนูลินส่งผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีม โดยปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น ไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลินร้อยละ 75 มีค่าเนื้อสัมผัสสูงสุด คือ 20,698 g force และไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มีค่าเนื้อสัมผัสน้อยที่สุด คือ 9,745 g force ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (10) ที่ใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทราย 4 ระดับ คือ ร้อยละ 5 15 50 และ 100 พบว่าเมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นไอศกรีมจะมีค่าความแข็งมากขึ้นและเวลาในการแช่แข็งจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอินนูลินจะมีคุณสมบัติเป็นเจลเมื่อมีการใส่ในปริมาณที่มากขึ้น (8) ซึ่งอินนูลินทำให้น้ำเนื้อสัมผัสและคุณสมบัติด้านการไหลของไอศกรีมมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีการเพิ่มความต้านทานของการเคี้ยว (Chewiness) ความต้านทานการไหล (Flow Consistency) และการไหลแบบ Psudoplastic (11) (การไหลที่มีคุณสมบัติ คือ เมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของการไหลลดลง (12)) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกิดจากการจับตัวกันระหว่างอินนูลินกับโปรตีนนม (11) จึงทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้น

3. ค่าสีของไอศกรีม

วัดค่าสีของไอศกรีมโดยนำไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งแล้วมาวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab วัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีไอศกรีมเมื่อปริมาณอวกั่ทดแทนเพิ่มขึ้น ผลการวัดค่าสีดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่าสี L^* a^* และ b^* ของไอศกรีมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่าความสว่าง (L^*) พบว่า ไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลิน) มีค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุด คือ 88.57 เมื่อเปรียบเทียบไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทนอินนูลินทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณอินนูลินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของไอศกรีมเพิ่มขึ้นด้วย โดยไอศกรีมเสริมอวกั่ทดแทน

อินนูลินที่ระดับร้อยละ 75 มีค่าความสว่าง (L^*) สูงที่สุด คือ 90.09 ส่วนไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มีค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุด คือ 88.77 เนื่องจากอินนูลินมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว จึงส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้น

ไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) สูงที่สุดคือ 4.91 และ 19.73 ตามลำดับ ไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่แตกต่างกับสูตร

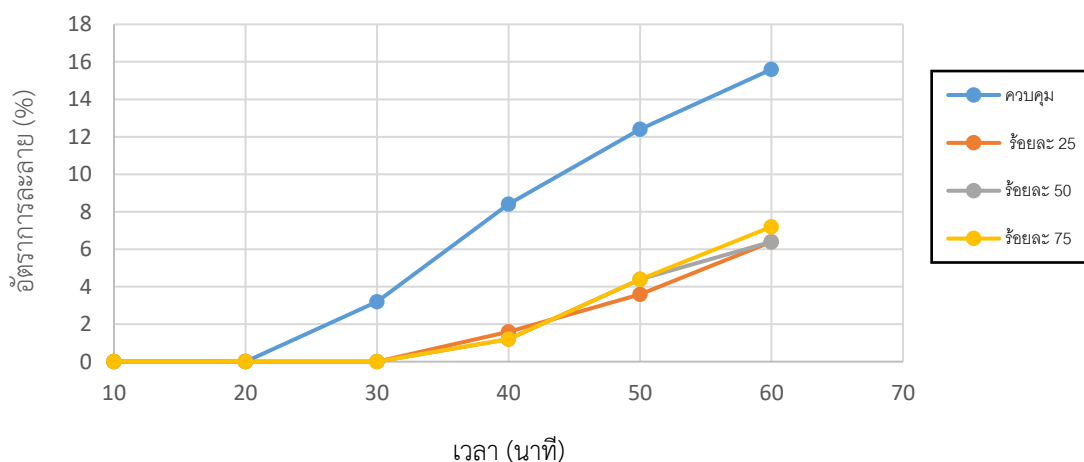
ควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 มีค่าอยู่ที่ 4.87 และ 19.44 ตามลำดับ ส่วนไอศกรีมเสริมอกไก่อินนูลินที่ระดับร้อยละ 50 และ 75 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 75 มีค่าความเป็นสีแดงค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) น้อยที่สุด คือ 3.01 และ 18.29 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นสีขาวของอินนูลินเป็นตัวกลบค่าสีตัวอื่นให้มีความสว่างมากขึ้น เมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้นค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง

ตารางที่ 2 ค่าโอเวอร์รัน ลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของไอศกรีม

ตัวอย่าง	ค่าโอเวอร์รัน (%)	ลักษณะเนื้อสัมผัส (g force)	L^*	a^*	b^*
ควบคุม	97.00±1.41 ^a	27,373±329.51 ^a	88.57±0.57 ^c	4.91±0.01 ^a	19.73±0.06 ^a
อินนูลินร้อยละ 25	36.00±1.41 ^d	9,745±430.63 ^d	88.77±0.84 ^{bc}	4.87±0.01 ^a	19.44±0.06 ^{ab}
อินนูลินร้อยละ 50	41.00±1.41 ^c	11,780±699.33 ^c	88.68±0.11 ^b	4.60±0.10 ^b	19.11±0.10 ^b
อินนูลินร้อยละ 75	61.07±0.71 ^b	20,698±905.10 ^b	90.09±0.07 ^a	3.01±0.10 ^c	18.29±0.32 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวดิ่งที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

อัตราการละลายของไอศกรีม



รูปที่ 1 อัตราการละลายของไอศกรีมสูตรควบคุมและทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 50 และ 75

4. อัตราการละลายของไอศกรีม

วัดอัตราการละลายของไอศกรีม โดยวางไอศกรีมที่อุณหภูมิห้องนาน 60 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักของไอศกรีมที่ละลายทุก ๆ 10 นาที จากนั้นนำมาคำนวณอัตราการละลายและสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบเพื่อศึกษาระดับการทดแทนอินนูลินที่ส่งผลต่ออัตราการละลายของไอศกรีม ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อวางไอศกรีมจนครบ 60 นาที ไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) มีอัตราการละลายสูงที่สุดคือร้อยละ 16 ที่เวลา 60 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอินนูลินส่งผลให้ไอศกรีมมีอัตราการละลายที่ลดลง ส่วนไอศกรีมเสริมอกไก่อินนูลินทั้ง 3 ระดับ มีอัตราการละลายที่ไม่แตกต่างกันเมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการละลายอยู่ที่ร้อยละ 6-7 แสดงให้เห็นว่าปริมาณอินนูลินที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่ออัตราการละลายของไอศกรีม เนื่องจากอินนูลินทำหน้าที่คล้ายกับสารให้ความคงตัว (Stabilizer) ดูดซับความชื้นที่อยู่ภายในไอศกรีม ทำให้น้ำในไอศกรีมมีการเคลื่อนที่อย่างจำกัดหรือเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น (13) ทำให้ไอศกรีมมีอัตราการละลายที่ต่ำกว่าสูตรควบคุม

ผลการศึกษาความชอบด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม

ศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลิน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 25 50 และ 75 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ไอศกรีมนมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) โดยศึกษาด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น (นม) รสชาติ (หวาน) เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวม เพื่อคัดเลือกไอศกรีมนมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินในระดับที่เหมาะสมให้ผู้ชิมให้การยอมรับมากที่สุด สำหรับไปพิจารณาร่วมกับไอศกรีมนมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินระดับที่ให้คุณภาพทางกายภาพดีที่สุด จากนั้นนำไปพิจารณาร่วมกับไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน (ไอศกรีมนมปกติ) ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 และ 50 ผู้ชิมให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น (นม) รสชาติ (หวาน) เนื้อสัมผัส (เรียบเนียน) และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อยู่ในระดับความชอบปานกลาง

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมนมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินทั้ง 3 ระดับ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส			
	สูตรควบคุม	ร้อยละ 25	ร้อยละ 50	ร้อยละ 75
ลักษณะปรากฏ	7.81 ±0.90 ^a	7.87 ±1.10 ^a	7.78 ±0.95 ^{ab}	7.55 ±1.21 ^b
สี	7.84 ±0.92 ^{ab}	7.97 ±0.94 ^a	7.73 ±0.93 ^{ab}	7.64 ±1.07 ^b
กลิ่น (นม)	7.54 ±1.06 ^a	7.69 ±1.05 ^a	7.58 ±0.95 ^a	7.10 ±1.22 ^b
รสชาติ (หวาน)	7.51 ±1.22 ^a	7.57 ±1.24 ^a	7.50 ±1.18 ^a	6.78 ±1.21 ^b
เนื้อสัมผัส (เรียบเนียน)	7.32 ±1.15 ^a	7.55 ±1.18 ^a	7.37 ±1.15 ^a	6.92 ±1.18 ^b
ความชอบโดยรวม	7.53 ±1.18 ^a	7.69 ±1.15 ^a	7.51 ±1.09 ^a	7.00 ±1.19 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันหมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 75 ผู้ชิมให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อยู่ในระดับความชอบปานกลางถึง

ชอบเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอินนูลินเป็นสารให้ความหวานที่หวานน้อยกว่าน้ำตาลมีสีขาว ด้วยเหตุนี้เมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มมากขึ้นความหวานของไอศกรีมลดน้อยลง นอกจากนี้น้ำตาลเป็นส่วนผสมช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ดังนั้นเมื่อลดปริมาณน้ำตาล

ไอศกรีมจึงมีเนื้อสัมผัสที่ไม่ดีเท่ากับไอศกรีมสูตรควบคุม ผู้ชิมจึงให้คะแนนความชอบด้านรสชาติและเนื้อสัมผัสของไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 75 น้อยที่สุด คืออยู่ในระดับชอบเล็กน้อย

จากการทดสอบคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ทดแทนอินนูลินทั้ง 3 ระดับ โดยนำมาเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) พบว่าไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 50 มีคุณภาพทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับไอศกรีมสูตรควบคุม (ไอศกรีมเสริมอกไก่ไม่ใช้อินนูลิน) มากที่สุด และคุณภาพทางประสาทสัมผัสอยู่ในระดับความชอบปานกลาง ซึ่งเป็นความชอบระดับเดียวกับไอศกรีมสูตรควบคุมด้วยเหตุนี้จึงเลือกไอศกรีมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 50 มาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และพลังงาน เปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรพื้นฐาน (ไอศกรีมนมปกติ) ต่อไป เพื่อศึกษาผลของการเสริมอกไก่และการใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลต่อองค์ประกอบทางเคมีและพลังงานของไอศกรีม

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมนมเสริมอกไก่และอินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 50 เพื่อศึกษาผลของการเสริมอกไก่และใช้อินนูลินต่อองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีม โดยเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรพื้นฐาน (ไอศกรีมนมปกติที่ไม่เสริมอกไก่และใช้อินนูลิน) จากตารางที่ 4 พบว่าปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน และเถ้าของไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานและไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตและกากใยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานและไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนาพบว่า เมื่อเสริมอกไก่และใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลที่ระดับร้อยละ 50 ทำให้ไอศกรีมมีปริมาณความชื้น และโปรตีนสูงกว่าไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน โดยมีปริมาณความชื้นและโปรตีนอยู่ที่ร้อยละ 68.03 และ 11.79 ตามลำดับ ส่วนปริมาณไขมัน และเถ้าไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนามีปริมาณน้อยกว่าไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน มีค่าร้อยละ 6.02 และ 0.45 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีในไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานและไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนา

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในหน่วยบริโภค 100 กรัม	
	ไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน (ไม่เสริมอกไก่และใช้อินนูลิน)	ไอศกรีมนมที่พัฒนา (อกไกร้อยละ 10 และใช้อินนูลินร้อยละ 50)
ความชื้น	62.97 ±0.07	68.03 ±0.38
ไขมัน	16.85 ±1.08	6.02 ±0.71
โปรตีน	8.07 ±0.11	11.79 ±0.09
คาร์โบไฮเดรต ^{ns}	10.24 ±1.09	12.45 ±1.09
กากใย ^{ns}	1.17 ±0.08	1.24 ±0.11
เถ้า	0.69 ±0.03	0.45 ±0.01

หมายเหตุ: ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ค่าพลังงานของไอศกรีม

ค่าพลังงานของไอศกรีมสามารถคำนวณได้ โดยนำปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จากตารางที่ 4 มาใช้ในการคำนวณ โปรตีน 1 กรัม ให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรต 1 กรัม ให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี และไขมัน 1 กรัม ให้พลังงาน 9 กิโลแคลอรี

1. พลังงานของไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน

พลังงานของไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน

$$\begin{aligned} &= (\text{โปรตีน} \times 4) + (\text{คาร์โบไฮเดรต} \times 4) + (\text{ไขมัน} \times 9) \\ &= (8.07 \times 4) + (10.24 \times 4) + (16.85 \times 9) \\ &= 32.28 + 40.96 + 151.65 \\ &= 224.89 \text{ กิโลแคลอรี} \end{aligned}$$

2. พลังงานของไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนา

พลังงานของไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่พัฒนา

$$\begin{aligned} &= (\text{โปรตีน} \times 4) + (\text{คาร์โบไฮเดรต} \times 4) + (\text{ไขมัน} \times 9) \\ &= (11.79 \times 4) + (12.45 \times 4) + (6.02 \times 9) \\ &= 47.16 + 49.8 + 54.18 \\ &= 151.14 \text{ กิโลแคลอรี} \end{aligned}$$

จากการคำนวณพลังงานข้างต้นพบว่า การเสริมอกไก่ลงในไอศกรีม และใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 50 ในไอศกรีมเสริมอกไก่ นอกจากช่วยเพิ่มโปรตีนให้แก่ไอศกรีมแล้ว ยังเป็นการลดพลังงานให้แก่ไอศกรีมอีกด้วย เนื่องจากปริมาณไขมันในไอศกรีมเสริมอกไก่อมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าพลังงานของไอศกรีมลดลงเช่นกัน โดยน้ำหนักไอศกรีม 100 กรัม ไอศกรีมนมเสริมอกไก่ให้พลังงาน 151.14 กิโลแคลอรี ส่วนไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานให้พลังงาน 224.89 กิโลแคลอรี โดยมีพลังงานลดลง 73.75 กิโลแคลอรี คิดเป็นร้อยละ 32.79

สรุปผล

ผลการศึกษาปริมาณอินนูลินที่ใช้ทดแทนน้ำตาลทรายในไอศกรีมนมเสริมอกไก่

ผลการศึกษาปริมาณอินนูลินที่ใช้ทดแทนน้ำตาลทรายในไอศกรีมนมเสริมอกไก่ 3 ระดับ คือ ร้อย

ละ 25 50 และ 75 ของปริมาณน้ำตาลทรายทั้งหมด เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน พบว่าไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่ใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายมีค่าความหนืด ค่าโอเวอร์รัน ค่าเนื้อสัมผัส และอัตราการละลายที่น้อยกว่า ไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบไอศกรีมนมเสริมอกไก่ที่ใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทราย 3 ระดับ พบว่าเมื่อปริมาณอินนูลินเพิ่มขึ้น น้ำไอศกรีมมีค่าโอเวอร์รัน ค่าเนื้อสัมผัส และค่าความสว่าง (L^*) ของไอศกรีมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนอัตราการละลายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ชิมให้ความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของสูตรพื้นฐาน ไอศกรีมนมเสริมอกไก่ทดแทนอินนูลินที่ระดับร้อยละ 25 และ 50 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อยู่ในระดับชอบปานกลาง การใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 50 เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและพลังงานของไอศกรีม

เมื่อใช้อินนูลินทดแทนน้ำตาลที่ระดับร้อยละ 50 ในไอศกรีมเสริมอกไก่ พบว่า ไอศกรีมที่พัฒนามีปริมาณความชื้นและโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณไขมันและเถ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตและกากใยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 นอกจากนี้ไอศกรีมที่พัฒนาให้พลังงาน 151.14 กิโลแคลอรี น้อยกว่าไอศกรีมสูตรพื้นฐานที่ให้พลังงาน 224.89 กิโลแคลอรี เป็นการทำให้พลังงานลดลงถึงร้อยละ 32.79

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาให้ไอศกรีมเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยใช้สารทดแทนไขมันเพื่อทดแทนไขมันจากวิปครีม และใช้อิมัลซิไฟเออร์ทดแทนไข่แดง เพื่อลดระดับคอเลสเตอรอลในไอศกรีม
2. ควรมีการทดสอบทางการตลาด เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อไอศกรีมนมเสริมอกไก่
3. ควรมีการปรับส่วนผสมให้เป็นผงทั้งหมด เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพและง่ายต่อการผลิต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. ส่วนแบ่งตลาดไอศกรีม ปี 2561. [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ. สถาบันอาหาร. 2562. [สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ม.ค. 2561]. จาก <http://fic.nfi.or.th/FoodMarketShareInThailandDetail.php?id=262>.
2. ศิริพร ตันจ่อ, ครรชิต จุดประสงค์, ชัญญิตา ไชโยโต, สนั่น จอกลอย. อินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรค์ในแก๊นตะวันสายพันธุ์ต่างๆ. KRU Res J. 2555;17(11):25-34.
3. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนพานนท์. Inulin / อินนูลิน. [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: Food Network Solution Co., Ltd.; มปป. [สืบค้นเมื่อวันที่ 24 ต.ค. 2562]. จาก: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2068/>.
4. กมลพิพัฒน์ ชนะสิทธิ์, ปรัชญา แพนงคณ, ณนันท แดงสังวาลย์. การพัฒนาไอศกรีมโยเกิร์ตเสริมว่านหางจระเข้.

รายงานการวิจัย. คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. 2557.

5. AOAC. Official Method of Analysis of AOAC International. 17th ed. Virginia: The Association of Official Analytical Chemists; 2000.
6. Rodríguez-García J, Salvador A, Hernando I. Replacing Fat and Sugar with Inulin in Cakes: Bubble Size Distribution, Physical and Sensory Properties. Food Bioprocess Technol. 2014;7:964–74.
7. Beccard S, Bernard J, Wouters R, Gehrich K, Zielbauer B, Mezger M, Vilgis T.A. Alteration of the structural properties of inulin gels. Food Hydrocolloids. 2019;89:302-10.
8. Shoaib M, Shehzad A, Omar M, Rakha A, Raza H, Sharif HR, Shakeel A, Ansari A, Niazi S. Inulin: Properties, health benefits and food applications. Carbohydr Polym. 2016;147:444-54.
9. Ice cream science. [internet]. Manchester. n.d. n.p. Fiber in Icecream. 2018. [Accessed 15 January 2018]. [10.00 a.m.] Available from: http://icecreamscience.com/fiber-in-ice-cream/#1_nutritional_value.
10. Wood JM. Sensory Evaluation of Ice Cream Made with Prebiotic Ingredients Substituted for Sugar [master's thesis]. Nebraska. University of Nebraska – Lincoln. 2011
11. Meyer D, Bayarri S, Tárrega A, Costell E. Inulin as texture modifier in dairy products. Food Hydrocolloids. 2011;25:1881-90.

12. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์.
Pseudoplastic fluid / ของไหลแบบซูโดพลาสติก.
[อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: Food Network
Solution Co., Ltd.; มปป. [สืบค้นเมื่อวันที่ 29
เม.ย. 2563]. จาก: <https://bit.ly/36ynKml>
13. Syed QA, Anwar S, Shukat R, Zahoor T.
Effects of different ingredients on texture of
ice cream. Journal of Nutritional Health &
Food Engineering. 2018;8(6):422-35.



การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บสารหอมด้วยเทคนิคพิกเกอร์อิงอิมัลชัน

Preparation of Polymer Microcapsules Encapsulated Fragrance by Pickering Emulsion Technique

กัลปิงหา รัตนไทรแก้ว¹ อมร ไชยสัตย์^{1,2} จิรศักดิ์ ตรีพรหม³ และ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์^{1,2*}

Kanlapangaha Rattanasaikeaw¹, Amorn Chaiyasat^{1,2}, Jirasak Three-prom³ and Preeyaporn Chaiyasat^{1,2*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²หน่วยวิจัยออกแบบและพัฒนาวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

³บริษัทเอสทีพี เคมี โซลูชั่นส์ จำกัด 219/41 หมู่ที่ 6 ต.บางรักพัฒนา อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

²Advanced Materials Design and Development Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

³STP CHEM SOLUTIONS CO., LTD., 219/41 Moo 6, Bang Rak Phatthana, Bang Bua Thong, Nonthaburi 11110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: p_chaiyasat@mail.rmUTT.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 30 March, 2020

Revised: 28 April, 2020

Accepted: 13 May, 2020

Available online: 28 May, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.5

Keywords: microcapsules, suspension polymerization, pickering emulsion, fragrance, zinc oxide nanoparticles

In this research, the preparation of polymethyl methacrylate-co-ethylene glycol dimethacrylate (PMMA-co-EGDMA)) microcapsules encapsulated methyl anthranilate as a fragrance model by micro-suspension polymerization was studied. The monomer droplets were prepared by pickering emulsion method using zinc oxide nanoparticles as a particulate stabilizer. The ratios of monomers: MA, MMA: EGDMA and initiator concentration were investigated. From the experimental result, it was found that using monomers: methyl anthranilate of 70: 30, MMA: EGDMA of 50: 50 and initiator concentration of 8 wt% of monomers was an optimum condition for the preparation of microcapsule. The high colloidal stable spherical microcapsules were

prepared without the formation of free polymer particles in an aqueous medium. The rough surface microcapsules due to the presence of zinc oxide nanoparticles as a particulate stabilizer distributed on microcapsule surface were successfully prepared. The encapsulation efficiency of methyl anthranilate in microcapsules was high up to approximately 100 %. When such optimum condition was applied for the encapsulation of commercial fragrance, the stable microcapsules with high encapsulation efficiency were obtained as well.

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิ (เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บสารหอม โดยใช้เมทิลแอนทรานิเลตเป็นสารหอมต้นแบบด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหดยดมอนอเมอร์ด้วยเทคนิคฟิสิกเกอร์ริงอิมัลชันที่ใช้อินนาคาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค ทำการศึกษาอัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต เมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต และปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไมโครแคปซูล คือ ใช้อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลตร้อยละ 70:30 เมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตร้อยละ 50:50 และปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์สามารถเตรียมไมโครแคปซูลทรงกลม ที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง ไม่เกิดอนุภาคพอลิเมอร์อิสระในชั้นน้ำผิวขรุขระ เนื่องจากมีอินนาคาโนซิงค์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวกระจายตัวอยู่ที่ผิวแคปซูลและมีประสิทธิภาพในการกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตสูงถึงประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการกักเก็บสารหอมทางการค้า ก็สามารถเตรียมไมโครแคปซูลที่มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพการกักเก็บสูงได้เช่นเดียวกัน

คำสำคัญ: ไมโครแคปซูล การสังเคราะห์แบบแขวนลอย ฟิสิกเกอร์ริงอิมัลชัน สารหอม อินนาคาโนซิงค์ออกไซด์

บทนำ

น้ำมันหอมระเหย (Essential Oil) เป็นสารประกอบทางเคมีที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นหอม ซึ่งน้ำมันหอมระเหยส่วนใหญ่ผลิตมาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ดอก ราก เปลือก ใบ เมล็ด ผล (1) น้ำมันหอมระเหยจะมีกลิ่นและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น เจอรานิโอล (Geraniol) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเทอร์ปีน (Terpenes) มีกลิ่นหอมและมีสมบัติป้องกันแมลงเป็นองค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยกลิ่นกุหลาบ เบนซิล อะซิเตต (Benzyl Acetate) และ เมทิล แอน ทรา นิ เลต (Methyl Anthranilate) เป็นสารในกลุ่มเอสเทอร์ (Ester) เป็นองค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยกลิ่นมะลิ ซึ่งใช้เป็นสารปรุงแต่งในอุตสาหกรรมอาหารและเป็นส่วนประกอบที่มีกลิ่นหอมในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคต่าง ๆ อีกทั้งน้ำมันหอมระเหยยังสามารถประยุกต์ใช้ในเครื่องสำอาง ยา (2) และอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ด้วย อย่างไรก็ตาม น้ำมันหอมระเหยมีข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งาน คือ มีอัตราการระเหยที่รวดเร็ว และโมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยบางชนิดสามารถเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับสภาวะแวดล้อมภายนอก เช่น แสง ความร้อน ออกซิเจน และความชื้นได้ จึงไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน

โดยตรง ดังนั้น เพื่อควบคุมการปลดปล่อยกลิ่นหอมให้ยาวนานและป้องกันการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะภายนอก จึงจำเป็นต้องกักเก็บน้ำมันหอมระเหยให้อยู่ในแคปซูล ที่เรียกว่า การเอนแคปซูลชัน (Encapsulation) (3) ซึ่งเป็นกระบวนการกักเก็บสารสำคัญ ที่เรียกว่า แกน (Core) ไว้ในวัสดุห่อหุ้มที่เรียกว่า เปลือก (Shell) ซึ่งการกักเก็บสารเหล่านี้ด้วยพอลิเมอร์ เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเปลือกมีความแข็งแรงสูง เกิดปฏิกิริยากับวัสดุที่เป็นแกนต่ำ ซึ่งจะเหมาะสมกับการกักเก็บสารชนิดต่าง ๆ โดยเทคนิคหนึ่งที่สามารถเตรียมพอลิเมอร์แคปซูลที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูง คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย (4, 5) (Suspension Polymerization) โดยอาศัยกลไกการแยกวัฏภาคภายใน (Internal Phase Separation) ซึ่งในระบบจะแบ่งออกเป็น 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคกระจาย (Dispersed Phase) หรือวัฏภาคอินทรีย์ (Organic Phase) และวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) โดยวัฏภาคกระจายจะประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ สารแกนกลางที่ต้องการกักเก็บ และตัวริเริ่มปฏิกิริยาผสมเป็นเนื้อเดียวกันนำไปกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องซึ่งเป็นน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวกระจายตัวอยู่ เมื่อทำการปั่นด้วยแรงเฉือนสูงจะเกิดเป็นหยดสารอินทรีย์ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง ทำการสังเคราะห์จะได้พอลิเมอร์แคปซูลที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เนื่องจากใช้น้ำเป็นวัฏภาคต่อเนื่องและไม่ใช้ตัวทำละลายในการสังเคราะห์ จึงเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในระหว่างการผลิตด้วยเทคนิคนี้ ในวัฏภาคต่อเนื่องจะมีสารลดแรงตึงผิวทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของหยดมอนอเมอร์ โดยทั่วไปจะใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดดั้งเดิมที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol; PVA) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการใช้อนุภาคของแข็ง (Solid Particles) มาเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค (Particulate Stabilizer) แทนชนิดดั้งเดิม โดยเรียกเทคนิคนี้ว่า พิกเกอร์ริงอิมัลชัน (Pickering Emulsion) (6-11) เป็นเทคนิคในการเตรียมอิมัลชันที่ถูก

ทำให้เสถียรด้วยอนุภาคของแข็งระดับนาโนเมตรซึ่งทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยยังคงรักษาคุณสมบัติของอิมัลชันเหมือนกับการใช้สารลดแรงตึงผิวแบบดั้งเดิม ซึ่งสามารถรักษาความเสถียรของอิมัลชันได้ดี ลดการเกิดฟอง มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านอาหาร (12) การบำบัดน้ำเสีย (13, 14) เครื่องสำอาง (15) และด้านเภสัชกรรม (16, 17)

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide Nanoparticles) (18-23) เป็นอนุภาคชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และมีสมบัติที่สามารถใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาคได้ นอกจากนี้ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ยังมีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial Property) ดังนั้น หากนำอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มาใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาคในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บน้ำมันหอมระเหยจะทำให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์ มีกลิ่นหอมและมีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียพร้อมกัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บสารหอมด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหยดสารอินทรีย์แบบพิกเกอร์ริงอิมัลชันที่ใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค ซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลให้กลิ่นหอมที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์ และต้านเชื้อแบคทีเรียในเวลาเดียวกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี

มอนอเมอร์เมทิล เมทาคริเลต (Methyl methacrylate; MMA, 99%, Aldrich, USA) และเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (Ethylene glycol dimethacrylate; EGDMA, 98%, Aldrich, Germany) ทำให้บริสุทธิ์โดยการผ่านคอลัมน์ที่ใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide; Al_2O_3 , Surface area 120-190 m^2/g , Kemaus, Australia) เป็นวัฏภาคคงที่ (Stationary

phase) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide; BPO, 72-77%, Merck, USA) ทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ด้วยเมทานอล (Methanol, 99.8%, Scharlau, Spain) สำหรับใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา เมทิลแอนทรานิเลต (Methyl anthranilate; MA, 99%, Alfa Aesar, England) เป็นสารหอมต้นแบบและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanoparticles, 20 wt% in H₂O, Aldrich, USA) ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค

วิธีทดลอง

1. การเตรียมพอลิ (เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอล ไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย

การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นแรก ทำการเตรียมหยดมอนอเมอร์ด้วยวิธีพิกเกอร์ริงอิมัลชัน เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบน้ำมันซึ่งประกอบไปด้วยเมทิลเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์หลัก เอทิลีนไกลคอลไไดเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์เชื่อมร่างแห เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเมทิลแอนทรานิเลตเป็นสารหอมต้นแบบ ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เกล่งในวัฏภาคต่อเนื่องที่เป็นชั้นน้ำที่มีอนุภาค

นาโนซิงค์ออกไซด์กระจายตัวอยู่ ปั่นเตรียมหยดมอนอเมอร์ด้วยโฮโมจีไนเซอร์ที่อัตราเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ ส่วนขั้นที่สองเป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยเทสารแขวนลอยของหยดมอนอเมอร์ที่ได้จากขั้นที่ 1 ใส่ลงในขวดก้นกลมและปิดด้วยจุกยางซิลิโคน แล้วทำให้อยู่ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนโดยใช้ปั๊มดูดสลับกับเป่าแก๊สไนโตรเจน ทำซ้ำประมาณ 5 รอบ จากนั้น นำขวดก้นกลมใส่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิโดยทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่กักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตไว้ภายใน โดยในขั้นตอนนี้ ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลดังนี้

1.1 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต ที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก เพื่อพิจารณาผลต่อรูปร่างและสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล ร้อยละการบรรจุ (%Loading) และการกักเก็บ (% Encapsulation) เมทิลแอนทรานิเลต ดังสภาวะในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหยดแบบพิกเกอร์ริงอิมัลชัน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต

Phase	Chemicals		Monomers :MA (%w/w)		
			80: 20	70: 30	50: 50
Oil	MMA	(g)	2.00	1.75	1.25
	EGDMA	(g)	2.00	1.75	1.25
	MA	(g)	1.00	1.50	2.50
	BPO (8 %wt of monomer)	(g)	0.32	0.28	0.20
Aqueous	ZnO nanoparticles	(g)	0.45	0.45	0.45
	Water	(g)	44.23	44.27	45.35

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลดด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหยดแบบฟิกเกอร์อิมัลชัน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต

Phase	Chemicals		MMA : EGDMA (%w/w)		
			80: 20	70: 30	50: 50
Oil	MMA	(g)	2.80	2.45	1.75
	EGDMA	(g)	0.70	1.05	1.75
	MA	(g)	1.50	1.50	1.50
	BPO (8 %wt of monomer)	(g)	0.28	0.28	0.28
Aqueous	ZnO nanoparticles	(g)	0.45	0.45	0.45
	Water	(g)	44.27	44.27	44.27

ตารางที่ 3 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลดด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหยดแบบฟิกเกอร์อิมัลชัน ที่ปริมาณต่าง ๆ ของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

Phase	Chemicals		Initiator (%w/w)		
			6	8	10
Oil	MMA	(g)	1.75	1.75	1.75
	EGDMA	(g)	1.75	1.75	1.75
	MA	(g)	1.50	1.50	1.50
	BPO (8 %wt of monomer)	(g)	0.21	0.28	0.35
Aqueous	ZnO nanoparticles	(g)	0.45	0.45	0.45
	Water	(g)	44.34	44.27	45.20

1.2 อัตราส่วนของเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก เพื่อพิจารณาผลของปริมาณมอนอเมอร์เชื่อมร่างแหที่มีผลต่อความแข็งแรงของเปลือกพอลิเมอร์ ลักษณะไมโครแคปซูล ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลด โดยใช้อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทราโนเลดที่ร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก ดังสภาวะที่แสดงในตารางที่ 2

1.3 ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ทำการศึกษาปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 6 8 และ 10 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ เพื่อพิจารณาผลของปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (%Conversion) สูงที่สุด ดังสภาวะในตารางที่ 3

2. การหาลักษณะเฉพาะและสมบัติของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

ศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้โดยศึกษารูปร่างและลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope; OM, SK-100EB & SK-100 ET, Seek Inter Co. Ltd.,

Thailand) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM, JSM-6510, JEOL, JEOL Co. Ltd., Japan) วิเคราะห์หาร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ด้วยการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetry) และวิเคราะห์หาปริมาณของเมทิลแอนทรานิเลตในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในรูปของร้อยละการบรรจุ (% Loading experiment; %L_{expt}) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ โดยวิเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการให้ความร้อนคงที่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ส่วนร้อยละการบรรจุทางทฤษฎี (%Loading theory; %L_{th}) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$\%L_{th} = \frac{W_F}{W_F + \left(\frac{W_m \times \%Conversion}{100} \right)} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_F และ W_m คือ น้ำหนักของเมทิลแอนทรานิเลตและมอนอเมอร์จากสภาวะการทดลอง ตามลำดับ

ส่วนประสิทธิภาพการกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตหรือร้อยละการกักเก็บ (%Encapsulation) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$\%Encapsulation = \frac{\%L_{expt}}{\%L_{th}} \times 100 \quad (2)$$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

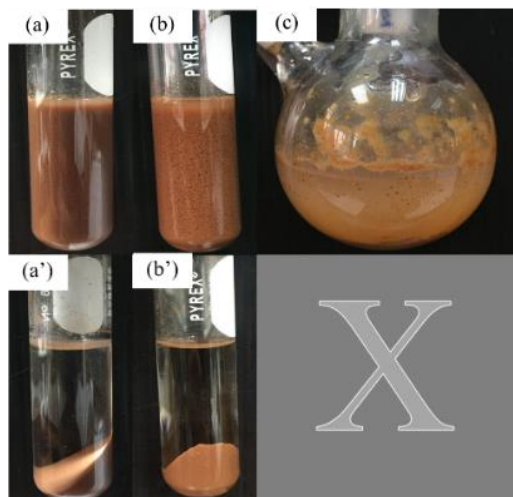
การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอยโดยอาศัยกลไกการแยกวัฏภาคภายใน เริ่มต้นจากการผสมมอนอเมอร์ที่ต้องการกักเก็บ และตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นวัฏภาคอินทรีย์ เมื่อผสมลงในวัฏภาคต่อเนื่องแล้วทำการปั่นเตรียมหยด จะได้สารแขวนลอยที่มีหยดวัฏภาคอินทรีย์ขนาดในระดับไมโครเมตรกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องที่เป็นน้ำ เรียกว่า ระบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water) เมื่อเริ่มการสังเคราะห์จะเกิดพอลิเมอร์ขึ้นภายในหยดวัฏภาคอินทรีย์ห่อหุ้มสารที่ต้องการกักเก็บเอาไว้ เกิดเป็นพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

โดยทั่วไป เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพการกักเก็บค่อนข้างสูง เนื่องจากสารที่ต้องการกักเก็บถูกหุ้มอยู่ในหยดสารอินทรีย์ตั้งแต่เริ่มต้น (24, 25)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดไมโครแคปซูลและประสิทธิภาพในการกักเก็บของเมทิลแอนทรานิเลตที่ใช้เป็นสารหอมต้นแบบ

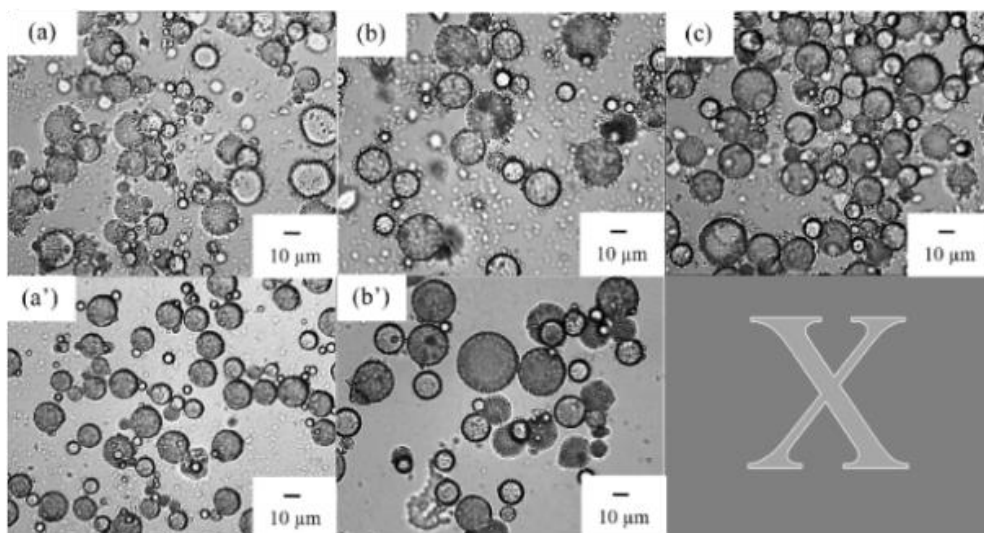
1.1 ผลของอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต

จากการศึกษาการเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) กักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย โดยการเตรียมหยดมอนอเมอร์ด้วยเทคนิคพิกเกอร์อิงอิมัลชันที่ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลตที่อัตราส่วนร้อยละ 80:20 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณมอนอเมอร์เป็นร้อยละ 70 และ 80 สามารถเตรียมแคปซูลของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) กักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตได้ สารแขวนลอยมีสีน้ำตาล มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง ไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 1 (a และ b) เมื่อนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที พบว่าไมโครแคปซูลที่ได้ตกตะกอนอยู่ด้านล่าง เนื่องจากความหนาแน่นรวมสูงกว่าน้ำ และไม่พบอนุภาคพอลิเมอร์อิสระ (Free Polymer Particles) ในชั้นน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากชั้นน้ำที่ใส ดังรูปที่ 1 (a' และ b') แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลแอนทรานิเลตเป็นร้อยละ 50 แคปซูลที่ได้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากมีปริมาณเมทิลแอนทรานิเลตมาก และปริมาณพอลิเมอร์ที่หุ้มตัวทำให้อาจไม่สามารถหุ้มเมทิลแอนทรานิเลตได้สมบูรณ์ ดังรูปที่ 1 (c)



รูปที่ 1 สารแขวนลอยของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต โดยการเตรียมหยุดแบบฟิกเกอร์อิงอิมัลชัน ก่อน (a-c) และหลัง (a' และ b') การปั่นเหวี่ยง ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 80:20 (a และ a') 70:30 (b และ b') และ 50:50 (c')

เมื่อศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าหยดมอนอเมอร์และ ไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบเนื่องจากมีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กระจายตัวอยู่ที่พื้นผิว ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดอนุภาค ดังรูปที่ 2 (a-b และ a'-b') โดยพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้มีร้อยละที่มอนอเมอร์เปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ 46 และ 42 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาร้อยละการกักเก็บ และการบรรจุเมทิลแอนทรานิเลตในไมโครแคปซูล พบว่าที่อัตราส่วน 70:30 มีร้อยละการบรรจุเมทิลแอนทรานิเลตในไมโครแคปซูลและการกักเก็บมากที่สุด ที่ร้อยละ 52 และ 103 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังตารางที่ 4 จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลตที่ร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม



รูปที่ 2 Optical Micrograph ของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต โดยการเตรียมหยุดแบบฟิกเกอร์อิงอิมัลชัน ของหยดมอนอเมอร์ (a-c) และไมโครแคปซูล (a' และ b') ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 80:20 (a และ a') 70:30 (b และ b') และ 50:50 (c')

ตารางที่ 4 ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตในไมโครแคปซูลที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลต

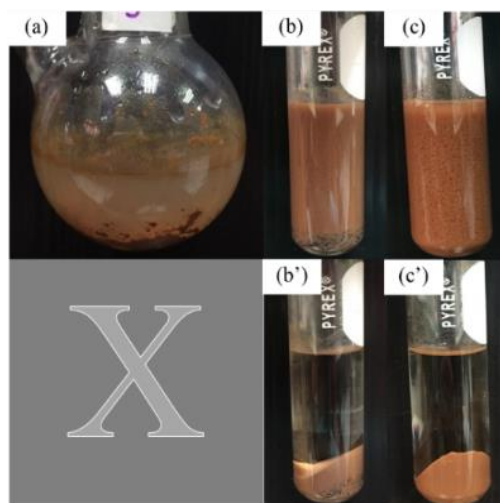
Monomers : MA	Conversion (wt%) ($\pm$ SD)*	Loading (wt%)		Encapsulation (wt%) ($\pm$ SD)*
		Experiment ($\pm$ SD)*	Calculation ($\pm$ SD)*	
80 : 20	46 ($\pm$ 1.31)	37 ($\pm$ 0.85)	36 ($\pm$ 0.64)	105 ($\pm$ 2.40)
70 : 30	42 ($\pm$ 0.69)	52 ($\pm$ 0.39)	50 ($\pm$ 0.41)	103 ($\pm$ 0.77)
50 : 50	-	-	-	-

* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

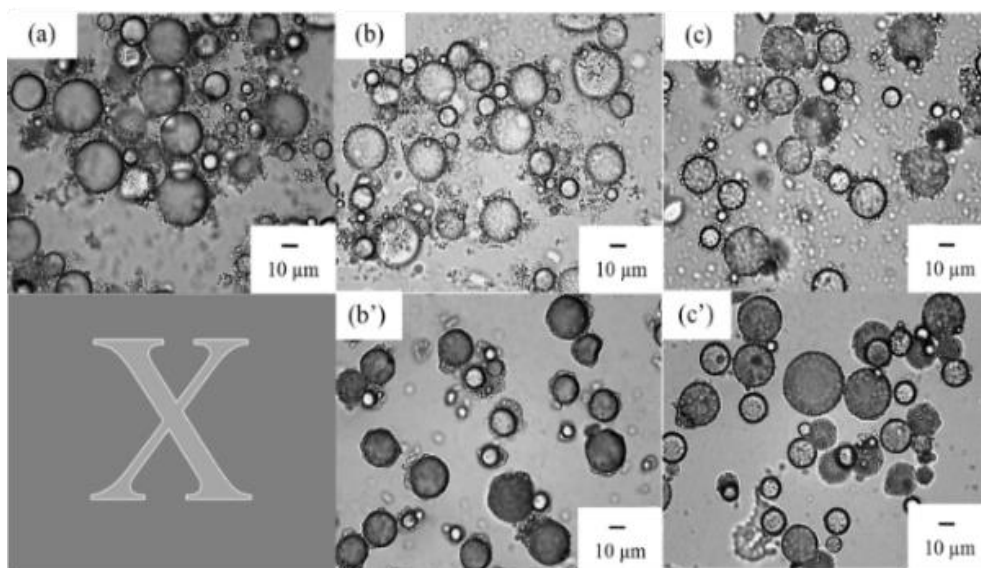
1.2 ผลของอัตราส่วนของเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต

เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล จึงได้ศึกษาการเพิ่มเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตซึ่งเป็นมอนอเมอร์เชื่อมร่างแห ที่อัตราส่วนระหว่างเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตที่ร้อยละ 80:20 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตเพียงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แคปซูลที่ได้จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ไม่มีความเสถียรทางคอลลอยด์ ดังรูปที่ 3 (a) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต เป็นร้อยละ 30 และ 50 สามารถเตรียมสารแขวนลอยสีน้ำตาลที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง และไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 3 (b และ c) ซึ่งน่าจะเนื่องจากแคปซูลที่ได้มีความแข็งแรงของเปลือกมากขึ้น จึงลดการจับตัวกัน เมื่อนำไปปั่นเหวี่ยงพบว่าไมโครแคปซูลที่ได้ตกตะกอนอยู่ด้านล่าง และไม่พบอนุภาคพอลิเมอร์อิสระในชั้นน้ำ ดังรูปที่ 3 (b' และ c') หยดมอนอเมอร์และไมโครแคปซูลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบ เนื่องจากมีอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์กระจายตัวอยู่ที่พื้นผิว ดังรูปที่ 4 (b-c และ b'-c') เมื่อนำแคปซูลที่เตรียมได้ไปศึกษา ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บ (ตารางที่ 5) พบว่าที่อัตราส่วน 50:50

ร้อยละการกักเก็บ (103 %) สูงกว่าที่อัตราส่วน 70:30 (95%) จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอล ไดเมทาคริเลตที่ 50:50 เป็นสถานะที่เหมาะสม



รูปที่ 3 สารแขวนลอยของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต โดยการเตรียมหดยแบบฟีกเกอร์ริงอิมัลชัน ก่อน (a-c) และหลัง (b' และ c') การปั่นเหวี่ยงที่อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 80:20 (a) 70:30 (b และ b') และ 50:50 (c และ c')



รูปที่ 4 Optical micrograph ของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลต โดยการเตรียมหยดแบบพิกเกอร์อิมัลชันของหยดมอนอเมอร์ (a-c) และไมโครแคปซูล (b' และ c') ที่อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตต่อ เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 80:20 (a) 70:30 (b และ b') และ 50:50 (c และ c')

ตารางที่ 5 ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลตในไมโครแคปซูล ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต

MMA : EGDMA	Conversion (wt%) (±SD)*	Loading (wt%)		Encapsulation (wt%) (±SD)*
		Experiment (±SD)*	Calculation (±SD)*	
80 : 20	-	-	-	-
70 : 30	24 (±1.81)	59 (±1.15)	64 (±1.73)	95 (±1.36)
50 : 50	42 (±0.69)	52 (±0.39)	50 (±0.41)	103 (±0.77)

* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)

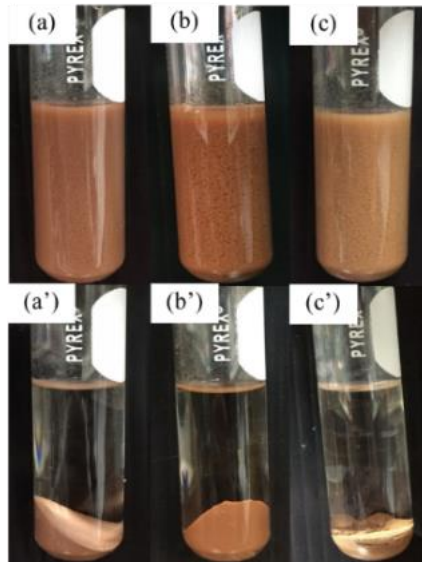
1.3 ผลของปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์มีค่าไม่สูง ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์สูงที่สุด ซึ่งจะทำให้เปลือกแคปซูลมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยศึกษาปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 6 8 และ 10 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าลักษณะสารแขวนลอย

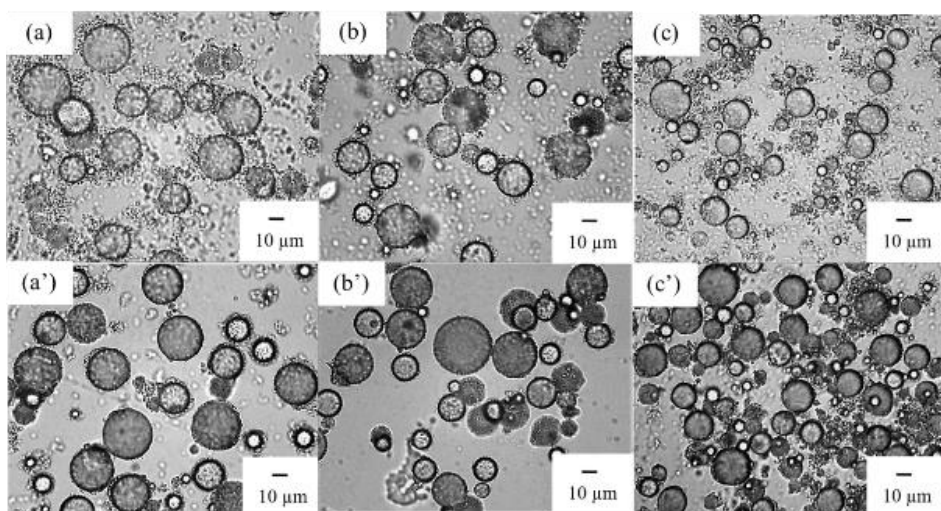
และแคปซูลที่ได้ไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยเมื่อใช้ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บ (42, 52 และ 103 ตามลำดับ) มากกว่าที่ปริมาณร้อยละ 6 (43, 43 และ 87 ตามลำดับ) และ 10 (14, 50 และ 66 ตามลำดับ) โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาจากร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ที่ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาร้อยละ 6 และ 8 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อ

ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งน่าจะเนื่องจากมีปริมาณของอนุมูลอิสระในระบบมากขึ้น ทำให้อัตราการสิ้นสุดการต่อสายโซ่ (Termination) เพิ่มขึ้น จึงทำให้ร้อยละการเปลี่ยน

มอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลทำให้เปลือกแคปซูลบางหรือการหุ้มไม่สมบูรณ์ ร้อยละการบรรจุจึงลดลงอย่างมาก ดังนั้น จึงเลือกใช้ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 8 เป็นสถานะที่เหมาะสม



รูปที่ 5 สารแขวนลอยของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลต โดยการเตรียมหดยดแบบพิกเกอร์อิงอิมัลชัน ก่อน (a-c) และหลัง (a'-c') การปั่นเหวี่ยง โดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 6 (a และ a') 8 (b และ b') และ 10 (c และ c')

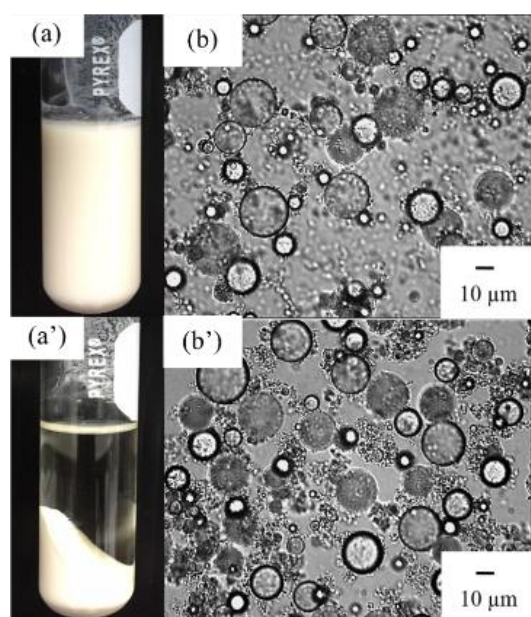


รูปที่ 6 Optical Micrograph ของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทราโนเลต โดยการเตรียมหดยดแบบพิกเกอร์อิงอิมัลชัน ของหดยดมอนอเมอร์ (a-c) และไมโครแคปซูล (a'-c') โดยใช้ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก) : 6 (a และ a') 8 (b และ b') และ 10 (c และ c')

ตารางที่ 6 ร้อยละการเปลี่ยนมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ ร้อยละการบรรจุและการกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตในไมโครแคปซูล ที่ปริมาณต่าง ๆ ของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

Initiator (wt%)	Conversion (wt%) ($\pm$ SD)*	Loading (wt%)		Encapsulation (wt%) ($\pm$ SD)*
		Experiment ($\pm$ SD)*	Calculation ($\pm$ SD)*	
6	43 ($\pm$ 2.24)	43.32 ($\pm$ 2.07)	49.88 ($\pm$ 1.28)	86.84 ($\pm$ 4.15)
8	42 ($\pm$ 0.69)	51.68 ($\pm$ 0.39)	50.35 ($\pm$ 0.41)	102.64 ($\pm$ 0.77)
10	14 ($\pm$ 3.02)	50.30 ($\pm$ 1.39)	75.84 ($\pm$ 3.93)	66.33 ($\pm$ 1.83)

* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3)



รูปที่ 7 สารแขวนลอยของพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บสารให้กลิ่นหอมทางการค้า โดยการเตรียมหยดแบบพิกเกอร์ริงอิมัลชัน ก่อน (a) และหลัง (a') การปั่นเหวี่ยง และ Optical micrograph ของหยดมอนอเมอร์ (b) และไมโครแคปซูล (b')

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตที่ใช้เป็นสารหอมต้นแบบแล้ว จึงได้นำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการกักเก็บสารหอมทางการค้า ซึ่งพบว่าได้สารแขวนลอยสีขาวขุ่นที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง และไม่เกิดการ

จับตัวกันเป็นก้อน ดังรูปที่ 7 (a) เมื่อนำไปปั่นเหวี่ยงพบว่าไมโครแคปซูลที่ได้ตกตะกอนอยู่ด้านล่าง และไม่พบอนุภาคอิสระในชั้นน้ำ ดังรูปที่ 7 (a') โดยหยดมอนอเมอร์และไมโครแคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบ เช่นเดียวกับการเตรียมแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต ดังรูปที่ 7 (b และ b') ในขณะที่มีร้อยละการบรรจุและการกักเก็บที่ 26 ($\pm$ 0.59) และ 88 ($\pm$ 1.98) ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกักเก็บค่อนข้างสูง ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตที่ได้นี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกักเก็บสารหอมชนิดต่าง ๆ ได้

สรุปผล

จากการศึกษาการเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต) ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอย พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อเมทิลแอนทรานิเลตที่ร้อยละ 70:30 อัตราส่วนระหว่างเมทิลเมทาคริเลตต่อเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตที่ร้อยละ 50:50 และปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก สามารถเตรียมพอลิเมอร์ ไมโครแคปซูลกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลต ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวไม่เรียบเนื่องจากมีอนุภาคนาโนซึ่งคอกเกอร์กระจายตัวอยู่ที่พื้นผิว สารแขวนลอยที่ได้มีความเสถียรทางคอลลอยด์สูง และมีประสิทธิภาพการกักเก็บเมทิลแอนทรานิเลตสูงถึงประมาณ

ร้อยละ 100 เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการกักเก็บสารหอมทางการค้า ก็สามารถเตรียมไมโครแคปซูลที่มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพการกักเก็บสูงได้เช่นเดียวกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท (MSD60I0095)” จาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท เอสทีพี เคมี โซลูชันส์ จำกัด

เอกสารอ้างอิง

- Hyldgaard M, Mygind T, Meyer R. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Front Microbiol.* 2012;3:36-59.
- Pavithra PS, Mehta A, Verma RS. Essential oils: from prevention to treatment of skin cancer. *Drug Discov Today.* 2019;24(2):644-55.
- Kaur R, Kukkar D, Bhardwaj SK, Kim K-H, Deep A. Potential use of polymers and their complexes as media for storage and delivery of fragrances. *J Control Release.* 2018;285:81-95.
- Pansuwan J, Chaiyasat A. Innovative and high performance synthesis of microcapsules containing methyl anthranilate by microsuspension iodine transfer polymerization. *Polym Int.* 2017;66(12):1921-27.
- Chaiyasat P, Islam MZ, Chaiyasat A. Preparation of poly(divinylbenzene) microencapsulated octadecane by microsuspension polymerization: oil droplets generated by phase inversion emulsification. *RSC Adv.* 2013;3(26):10202-7.
- Ramsden W, Gotch F. Separation of solids in the surface-layers of solutions and ‘suspensions’ (observations on surface-membranes, bubbles, emulsions, and mechanical coagulation). — Preliminary account. *Proc Roy Soc Lond.* 1904;72:156-64.
- Pickering SU. CXCVI.—Emulsions. *J Chem Soc Trans.* 1907;91:2001-21.
- Yang Y, Fang Z, Chen X, Zhang W, Xie Y, Chen Y, et al. An Overview of Pickering Emulsions: Solid- Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications. *Front Pharmacol.* 2017;8:179-98.
- Chevalier Y, Bolzinger M- A. Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects.* 2013;439:23-34.
- Ma H, Luo M, Sanyal S, Rege K, Dai LL. The One-Step Pickering Emulsion Polymerization Route for Synthesizing Organic- Inorganic Nanocomposite Particles. *Materials.* 2010;3(2):1186-202.
- Binks BP. Particles as surfactants—similarities and differences. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 2002;7(1):21-41.
- Zhu F. Starch based Pickering emulsions: Fabrication, properties, and applications. *Trends Food Sci Technol.* 2019;85:129-37.
- Li Q, Zhao T, Li M, Li W, Yang B, Qin D, et al. One-step construction of Pickering emulsion via commercial TiO₂ nanoparticles for photocatalytic dye degradation. *Appl Catal B Environ.* 2019;249:1-8.

14. Demina PA, Grigoriev DO, Kuz'micheva GM, Bukreeva TV. Preparation of pickering-emulsion-based capsules with shells composed of titanium dioxide nanoparticles and polyelectrolyte layers. *Colloid J.* 2017;79(2):198-203.
15. Marto J, Gouveia LF, Gonçalves L, Chiari-Andréo BG, Isaac V, Pinto P, et al. Design of novel starch-based Pickering emulsions as platforms for skin photoprotection. *J Photochem Photobiol B Biol.* 2016;162:56-64.
16. Zhang K, Wu W, Guo K, Chen JF, Zhang PY. Magnetic polymer enhanced hybrid capsules prepared from a novel Pickering emulsion polymerization and their application in controlled drug release. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects.* 2009;349(1):110-6.
17. Shah BR, Li Y, Jin W, An Y, He L, Li Z, et al. Preparation and optimization of Pickering emulsion stabilized by chitosan-tripolyphosphate nanoparticles for curcumin encapsulation. *Food Hydrocoll.* 2016;52:369-77.
18. Siddiqi KS, Ur Rahman A, Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes. *Nanoscale Res Lett.* 2018;13(1):141-53.
19. Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, Kaus NHM, Ann LC, Bakhori SKM, et al. Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism. *Nano-Micro Lett.* 2015;7(3):219-42.
20. Hu X, Cook S, Wang P, Hwang H-m. In vitro evaluation of cytotoxicity of engineered metal oxide nanoparticles. *Sci Total Environ.* 2009;407(8):3070-2.
21. Salem W, Leitner DR, Zingl FG, Schratte G, Prassl R, Goessler W, et al. Antibacterial activity of silver and zinc nanoparticles against *Vibrio cholerae* and enterotoxigenic *Escherichia coli*. *Int J Med Microbiol.* 2015;305(1):85-95.
22. Premanathan M, Karthikeyan K, Jeyasubramanian K, Manivannan G. Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation. *Nanomed Nanotechnol.* 2011;7(2):184-92.
23. Pati R, Mehta RK, Mohanty S, Padhi A, Sengupta M, Vaseeharan B, et al. Topical application of zinc oxide nanoparticles reduces bacterial skin infection in mice and exhibits antibacterial activity by inducing oxidative stress response and cell membrane disintegration in macrophages. *Nanomed Nanotechnol.* 2014;10(6):1195-208.
24. Chaiyasat P, Chaiyasat A, Boontung W, Promdsorn S, Thipsit S. Preparation and Characterization of Poly(divinylbenzene) Microcapsules Containing Octadecane. *Mater Sci Appl.* 2011;2(8):1007-13.
25. Supatimusro D, Promdsorn S, Thipsit S, Boontung W, Chaiyasat P, Chaiyasat A. Poly(divinylbenzene) Microencapsulated Octadecane for Use as a Heat Storage Material: Influences of Microcapsule Size and Monomer/ Octadecane Ratio. *Polym Plast Technol Eng.* 2012;51(11):1167-72.



ผลของเพคตินจากเปลือกแตงโมต่อคุณภาพของแยมกระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sabdariffa* L.)

Effect of Pectin from Watermelon Rind on Quality of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Jam

อินทิรา ลิจันทรพร* นันทชนก นันทะไชย ปาลิดา ตั้งอนรรตน อัญชลินทร์ สิงห์คำ และ ประดิษฐ์ คำหนองไผ่
Intira Lichanporn*, Nanchanok Nanthachai, Palida Tanganurat, Auchalin Singkhum
and Pradit Kromnongpai

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อ.ธัญบุรี
จ.ปทุมธานี 12110

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

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 9 April, 2020

Revised: 26 May, 2020

Accepted: 4 June, 2020

Available online: 12 June, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.6

Keywords: watermelon rinds,
pectin, roselle jam

This research aimed to determine the chemical and physical properties of pectin from watermelon rind and applied the extracted pectin for roselle jam production. The white and green parts of watermelon rind were boiled, dried (60 °C, 15 hours), and extracted by using 0.05 M hydrochloric acid and distilled water at 90 °C with an extraction time of 60 min. The results showed that the optimal extraction method to extract pectin from watermelon rind was hydrochloric acid extraction because of the moisture, ash, methoxyl content and degree of esterification (%DE) of extracted pectin were the most similar to the commercial pectin. The obtained pectin can be categorized as high methoxyl pectin (HMP). The extracted pectin was applied to the roselle jam product. The concentration of pectin from watermelon rind was varied at 0.10, 0.49, and 0.89 %, compared with commercial pectin (0.49 %). Results showed that roselle jam added with the watermelon pectin and

control were not significantly different in color, total soluble solid, pH, and titratable acidity. All treatments showed that L^* , a^* , and b^* values were in the ranges of 20.97-21.80, 0.37-0.77 and 2.27-2.90, respectively. Sensory evaluation of appearance, color, odor, taste, texture, and overall acceptance results indicated that roselle jam added with the watermelon pectin and control were not significantly different. However, results indicated that the jam with 0.89 % watermelon rind pectin had a high overall acceptance which was not different from the commercial pectin. Therefore, pectin from watermelon rind could potentially be used for replacement of the commercial pectin in the food industry.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเพคตินจากเปลือกแตงโมและนำเพคตินไปใช้ในการผลิตแยมกระเจี๊ยบแดง โดยนำเปลือกแตงโมส่วนที่เป็นสีขาวและเขียวไปต้มและอบแห้ง (60 องศาเซลเซียส นาน 15 ชั่วโมง) และสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที พบว่าวิธีการสกัดเพคตินจากเปลือกแตงโมที่เหมาะสมคือการสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเนื่องจากมีความชื้น แล้ ปริมาณเมทอกซิล และค่าเอสเทอริฟิเคชัน (Degree of Esterification; %DE) ของสารสกัดเพคตินมีค่าใกล้เคียงกับเพคตินทางการค้ามากที่สุด เพคตินที่สกัดได้จัดเป็นเพคตินเมทอกซิลสูง (High Methoxyl Pectin; HMP) จากการใช้เพคตินจากเปลือกแตงโมที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.10 0.49 และ 0.89 เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้า (ร้อยละ 0.49) ผลแสดงให้เห็นว่าแยมกระเจี๊ยบที่เติมเพคตินจากเปลือกแตงโมและชุดควบคุมไม่มีความแตกต่างของค่าสี ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ ทุกชุดการทดลองมีค่าสี L^* , a^* และ b^* อยู่ในช่วง 20.97-21.80 0.37-0.77 และ 2.27-2.90 ตามลำดับ การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะ

ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมพบว่าแยมกระเจี๊ยบแดงที่เติมเพคตินจากเปลือกแตงโมและชุดควบคุมไม่มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแยมที่เติมเพคตินจากเปลือกแตงโมร้อยละ 0.89 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงไม่แตกต่างจาก เพคตินทางการค้า ดังนั้นเพคตินจากเปลือกแตงโมมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เทียบเท่าเพคตินทางการค้าโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร

คำสำคัญ: เปลือกแตงโม เพคติน แยม

บทนำ

ปัจจุบันมีของเสียเหลือทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นของเสียเหลือทิ้งจากครัวเรือนแหล่งค้าขายหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะของเสียเหลือทิ้งตามธรรมชาติที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น เปลือกของผักผลไม้ที่พบว่ามีเพคตินอยู่ในปริมาณสูงซึ่งเพคตินเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบตามธรรมชาติและยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานของผนังเซลล์พืชชั้นสูง ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด (Thickener) สารทำให้เกิดเจล (Gelling agent) สารให้ความคงตัว (Stabilizer) สารที่ทำให้อิมัลชันคงตัว (Emulsifier) และสารที่จับยึดเหนี่ยว (Cation-binding Agent) ใช้ใน

ผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เยลลี่ แยม โดยเพคตินนั้นต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้มีต้นทุนในการผลิตอาหารสูงจากการตรวจเอกสารงานวิจัยพบว่าเพคตินที่สกัดได้จากผลไม้ เช่น เปลือกมะนาวมีปริมาณเพคตินสูงเท่ากับร้อยละ 16.36 และมีปริมาณเมทอกซิลเท่ากับร้อยละ 11.38 ใกล้เคียงกับเพคตินทางการค้า (มีปริมาณเมทอกซิลร้อยละ 11.50) (1) ขวัญ และคณะ (2) ได้สกัดเพคตินจากเปลือกและกากผลส้มเหลืองซึ่งพบว่าเพคตินที่สกัดได้มีผลผลิต (Yield) ร้อยละ 18.48 ปริมาณความชื้นร้อยละ 7.79 ปริมาณเถ้าร้อยละ 5.42 ปริมาณกรดกาแลคทูโรนิก (Galacturonic acid) ร้อยละ 66.25 และปริมาณเมทอกซิล (Methoxyl) ร้อยละ 4.12 ซึ่งใกล้เคียงกับเพคตินระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้จากน้ำตาลและเมลลิตาลออลยังสามารถนำมาสกัดเพคตินได้ (3) เช่นเดียวกับการสกัดเพคตินจากของเหลือทิ้งขนุนซึ่งพบว่าเพคตินที่ได้มีปริมาณเมทอกซิลร้อยละ 2.69 ปริมาณกรดยูริกร้อยละ 57.08 และระดับการเกิดเอสเทอร์ร้อยละ 26.75 จัดเป็นเพคตินชนิดเมทอกซิลต่ำ และเมื่อนำไปทำเยลลี่สับปะรดพบว่าเยลลี่มีค่าความเป็นสีแดงสูงกว่าเยลลี่ที่ใช้เพคตินทางการค้าแต่มีความแข็งแรงของเจลใกล้เคียงกัน (4) การสกัดเพคตินนั้นมีหลายวิธี เช่น การสกัดด้วยไมโครเวฟ การสกัดด้วยเอนไซม์ การสกัดด้วยน้ำร้อน และการสกัดด้วยกรด ซึ่งการสกัดเพคตินด้วยไมโครเวฟ และเอนไซม์นั้นมีต้นทุนการสกัดสูงผลผลิตที่ได้ไม่แตกต่างจากการสกัดด้วยกรดและน้ำร้อน ซึ่งการสกัดด้วยกรดใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารด้วยกรดจะไปไฮโดรไลซ์ทำให้เพคตินที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ (Insoluble Pectin) ถูกไฮโดรไลซ์เป็นเพคตินในรูปที่ละลายน้ำ (Soluble Pectin) กรดที่นิยมใช้ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซิตริก (5) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดเพคติน ได้แก่ ชนิดของกรด อุณหภูมิ เวลาและกรด-ด่าง (6) ข้อดีของการใช้กรดคือได้เพคตินในปริมาณสูงมากกว่าการสกัดด้วยน้ำร้อน แต่การสกัดด้วยน้ำร้อนก็มีความปลอดภัยสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการสกัดเพคตินจากเปลือกแตงโมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่น ตลอดจนศึกษาผลของ

เพคตินจากเปลือกแตงโมต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แยมกระเจียบแดง ซึ่งคาดว่าเพคตินที่ได้จากเปลือกแตงโมสามารถทดแทนเพคตินทางการค้าได้ โดยช่วยลดต้นทุนการนำเข้าเพคตินที่มีราคาสูงจากต่างประเทศและเป็นการลดหรือใช้ของเสียเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์ในผลิตภัณฑ์แยม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเปลือกแตงโม

แตงโมซื้อจากห้างสรรพสินค้าท็อปซูเปอร์มาเก็ต (คัดเลือกแตงโมแบรนด์กลุ่มปลูกยักษ์ จากจังหวัดยโสธร ซึ่งได้รับการรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ เนื่องจากปลอดสารพิษ) การเตรียมตัวอย่างตัดแปลงกรรมวิธีมาจากงานวิจัยของณรงค์ (7) โดยนำแตงโมมาปอกเปลือกและล้างทำความสะอาด ขูดส่วนสีแดงออกเอาเฉพาะสีเขียวและสีขาว นำมาหั่นเป็นชิ้นขนาด 2x2 เซนติเมตรล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง ต้มเปลือกกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ จากนั้นบดด้วยเครื่องปั่นผลไม้ขนาด 2 นาที กรองวัตถุดิบผ่านผ้าขาวบาง นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 บดด้วยเครื่องบดละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 ไมโครเมตรเพื่อให้ได้เป็นผงและเก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

2. การสกัดเพคตินจากเปลือกแตงโม

นำเปลือกแตงโมที่สกัดได้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ มาสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก และน้ำกลั่น (7) ดังนี้

2.1 การสกัดเพคตินด้วยกรดไฮโดรคลอริก

นำเปลือกแตงโมบดแห้งที่เตรียมไว้ ใส่บีกเกอร์ 40 กรัม เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ อัตราส่วนของเปลือกบดแห้งต่อกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 1:12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นำไปสกัดในอ่างควบคุม

อุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส 60 นาที กรองผ่านผ้าขาวบาง 1 ชั้น แล้วนำเปลือกที่กรองได้ไปเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ อัตราส่วนของเปลือกต่อกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1:12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำไปสกัดอีกครั้ง กรองผ่านผ้าขาวบาง 1 ชั้น นำสารละลายที่ได้ทั้งสองครั้งมารวมกัน ทำการตกตะกอนเพคติน โดยเติมเอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ในอัตราส่วนสารละลายต่อเอทานอล 1:1 โดยปริมาตร (v/v) คนให้เข้ากัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 ชั่วโมง กรองแยกเอาตะกอนเพคตินผ่านผ้าขาวบาง 4 ชั้น ด้วยกรวยบุชเนอร์พร้อมทั้งล้างตะกอนเพคตินที่ได้ด้วยเอทานอลร้อยละ 95 จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ล้างตะกอนเพคตินด้วยอะซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 50 จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 มิลลิลิตร นำตะกอนเพคตินที่ได้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมงแล้วบดให้เป็นผง

2.2 การสกัดเพคตินด้วยน้ำกลั่น

นำเปลือกแดงโสมบดแห้งที่เตรียมไว้ ใส่ปิกเกอร์ 40 กรัม เติมน้ำกลั่น อัตราส่วนของเปลือกบดแห้งต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นำไปสกัดในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที กรองผ่านผ้าขาวบาง 1 ชั้น แล้วนำเปลือกที่กรองได้ไปเติมน้ำกลั่น อัตราส่วนของเปลือกต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:12 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วนำไปสกัดอีกครั้ง กรองผ่านผ้าขาวบาง 1 ชั้น นำสารละลายที่ได้ทั้งสองครั้งมารวมกัน ทำการตกตะกอนเพคติน โดยเติมเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ในอัตราส่วนสารละลายต่อเอทานอล 1:1 โดยปริมาตร ทำการคนผสมแรง ๆ ให้เข้ากัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 ชั่วโมง กรองแยกเอาตะกอนเพคตินผ่านผ้าขาวบาง 4 ชั้น ด้วยกรวยบุชเนอร์ พร้อมทั้งล้างตะกอนเพคตินที่ได้ด้วยเอทานอลร้อยละ 95 จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ล้างตะกอนเพคตินด้วยอะซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 50 จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 มิลลิลิตร นำตะกอนเพคตินที่ได้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วบดให้เป็นผง

3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเพคตินที่สกัดมาจากเปลือกแดงโสม ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่นเปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้า

นำผงเปลือกแดงโสมที่สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่นมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเพคตินโดยเปรียบเทียบเพคตินทางการค้าเกรด 150 (เมทอกซิลสูง) เป็นเพคตินจากแอปเปิ้ล ดังนี้

3.1 ปริมาณเพคตินตามวิธีของธานุวัฒน์ และคณะ (1) คำนวณหาปริมาณเพคตินดังสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณเพคติน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของเพคตินหลังสกัด (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบก่อนสกัด (กรัม)}} \quad (1)$$

3.2 ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC (8)

3.3 ปริมาณเมทอกซิล (MeO) ตามวิธีการของ Ranganna (9)

3.4 เอสเทอร์ฟิเคชัน (Degree of Esterification) ตามวิธีการของ Nwankezi และคณะ (10)

4. ศึกษาผลของการใช้ประโยชน์เพคตินที่สกัดจากเปลือกแดงโสมเปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดง

คัดเลือกเพคตินที่สกัดจากเปลือกแดงโสมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่นโดยเลือกจากปริมาณเมทอกซิล และค่าเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่มีปริมาณใกล้เคียงกับเพคตินทางการค้ามากที่สุด นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดง โดยแบ่งออกเป็น 4 สิ่งทดลอง (treatment) จำนวน 3 ซ้ำ/สิ่งทดลอง โดยวางแผนการทดลองแบบ บล็อก อย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ดังนี้ สิ่งทดลอง 1 เพคตินจากทางการค้าร้อยละ 0.49 สิ่งทดลอง 2 เพคตินจากเปลือกแดงโสมร้อยละ 0.10 สิ่งทดลอง 3 เพคตินจากเปลือกแดงโสมร้อยละ 0.49 และสิ่งทดลอง 4 เพคตินจากเปลือกแดงโสมร้อยละ 0.89 วิธีการผลิตแยมกระเจี๊ยบแดง

ดัดแปลงจาก นันทกร และลำไพโร (11) โดยนำดอก กระเจี๊ยบแห้ง 234.35 กรัม น้ำตาลทราย 263.16 กรัม กรดซิตริก 2 กรัม เกลือ 1 กรัม และแปรปริมาณเพคติน ระดับร้อยละ 0.10 0.49 และ 0.89 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าที่ร้อยละ 0.49 วิธีการ ดังนี้กระเจี๊ยบแห้ง (กระเจี๊ยบ:น้ำ = 1:20) ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที บดให้ละเอียดด้วย เครื่องปั่นอาหาร ประมาณ 15 วินาที (กระเจี๊ยบเข้มข้น) เคี่ยวกระเจี๊ยบเข้มข้นด้วยไฟอ่อน (สัดส่วนตามสูตร) พร้อมคนตลอดเวลา จนมีอุณหภูมิ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส ค่อย ๆ เติมส่วนผสมของน้ำตาลและ เพคติน พร้อมทั้งคนตลอดเวลา เคี่ยวจนได้อุณหภูมิ 104-105 องศาเซลเซียส จับเวลา 7-10 นาที วัดปริมาณ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดไม่น้อยกว่า 65 °บริกซ์ เติม สารละลายกรดซิตริกทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 85±1 องศาเซลเซียส บรรจุขวดพร้อมปิดด้วยฝาชนิด เกลียวมีขอบยางกันอากาศเข้า หล่อเย็นจนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เก็บที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมง วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และ ทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังนี้

4.1 ค่าสี วิเคราะห์ค่าสีตามระบบ CIE (L^* , a^* , b^*) ด้วย เครื่องวัดสี (Color Meter Chroma, CR200, Japan)

4.2 ความเป็นกรดต่าง นำตัวอย่าง 30 กรัม วัด ค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH Meter ซึ่งค่าที่ได้ แสดงปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำซึ่ง เกิดจากสารที่สามารถแตกตัวให้อนุกรดหรือเบสได้

4.3 ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ โดยใช้ตัวอย่าง แยมกระเจี๊ยบแดง 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างปริมาตร 2 มิลลิลิตร มาไตเตรทด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนความเข้มข้นร้อยละ 1 จำนวน 2-3 หยด เป็นตัวอินดิเคเตอร์ โดยมีจุดยุติที่ pH 8.2 ตัวอย่างจะเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู นำค่าปริมาณของ

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ต่อ 1 ตัวอย่างมา คำนวณ ในสมการที่ 2 รายงานหน่วยเป็นร้อยละ ดังนี้

$$\text{ปริมาณกรด (ร้อยละ)} = (A \times B \times 0.064)/C \quad (2)$$

กำหนดให้

A = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ต่อ 1 ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

C = ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

4.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยนำ ตัวอย่างแยมกระเจี๊ยบแดงมาตรวจวัดด้วยเครื่องดิจิตอล รีแฟรกโตมิเตอร์ (Digital Refractometer; ATAGO PR-101, Japan) รายงานผลเป็น °บริกซ์ (°Brix)

4.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส ใช้ผู้ ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน อายุระหว่าง 15-25 ปี ประเมินความชอบลักษณะสี กลิ่น รสชาติ เนื้อ สัมผัส และความชอบโดยรวม จากระดับคะแนน 9 (9-Point Hedonic Scaling) (1 หมายถึง ไม่ชอบที่สุด 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเพคติน ที่สกัดจากเปลือกแตงโมด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้า พบว่า ปริมาณเพคตินที่สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่น มีค่าเท่ากับร้อยละ 16.35 และ 6.16 (ตารางที่ 1) จากการ หาปริมาณความชื้นพบว่าเพคตินทางการค้ามีความชื้นสูง มากที่สุดแตกต่างจากเพคตินที่สกัดได้จากกรดไฮโดรคลอริก อย่างมีนัยสำคัญ และความชื้นของเพคตินจากการสกัด เปลือกแตงโมด้วยน้ำกลั่นมีความชื้นต่ำที่สุด ซึ่งมีความชื้น เท่ากับร้อยละ 11.37 7.88 และ 5.69 ตามลำดับ ส่วน ปริมาณเถ้าในเพคตินมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.69 7.82 และ 3.08 ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณเถ้าที่สกัดด้วยกรดไฮโดร คลอริกมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในระดับใกล้เคียงกับงานวิจัย

ของ ขวนิภูรุ และคณะ (2) ซึ่งได้ผลิตเพคตินจากเปลือกและกากส้มเหลืองที่ได้ปริมาณเอ้าร้อยละ 5.42 ปริมาณเมทอกซิลที่สกัดได้จากเพคตินสามารถบ่งบอกได้ว่าเพคตินนั้นเป็นเพคตินประเภทเมทอกซิลสูง (High Methoxyl Pectins; HMP) ซึ่งมีปริมาณเมทอกซิลตั้งแต่ร้อยละ 8.16 ขึ้นไป หรือ ประเภทเมทอกซิลต่ำ (Low Methoxyl Pectins; LMP) ที่มีปริมาณเมทอกซิลต่ำกว่าร้อยละ 8.16 (12) ปริมาณเมทอกซิลที่สกัดด้วยน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริกมีปริมาณสูงกว่าเพคตินทางการค้า แสดงให้เห็นว่า เพคตินที่สกัดได้เป็นเพคตินประเภทเมทอกซิลสูง การหาค่าเอสเทอร์ฟิเคชันของเพคตินทางการค้า เพคตินที่สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่นมีค่าร้อยละ 50.04 62.83 และ 93.73 ตามลำดับ โดยปริมาณเมทอกซิล และค่าเอสเทอร์ฟิเคชันมีผลต่อการเกิดเจลของเพคติน ซึ่งค่า DE ตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปจัดเป็นเพคตินชนิด HMP (12) ซึ่ง HMP สามารถเกิดเจลได้โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนและแรงไฮโดรโฟบิกระหว่างหมู่เมทอกซิลในสภาวะที่มีปริมาณน้ำตาลสูง และ pH ต่ำกว่า 3.5 (5)

แยมกระเจี๊ยบแดงทุกชุดการทดลองมีสีม่วงแดง (รูปที่ 1) และค่าสีของแยมในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันโดยมีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 21.03 20.97 21.73 และ 21.80 ตามลำดับ และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 2.70 2.90 2.90 และ 2.27 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) เท่ากับ 0.40 0.77 0.57 และ 0.37 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงพบว่ามีความเข้มข้นของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 65-68 °บริกซ์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 2.2-2.4 และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้เท่ากับร้อยละ 0.61 (ตารางที่ 3) ตามมาตรฐานการผลิตแยมปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วง 65.50-67.75 °บริกซ์ มีความเป็นกรด-ด่าง 2.8-3.5 และปริมาณกรดทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.89-0.97 ซึ่งในการผลิตแยมกระเจี๊ยบพบว่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้มีค่าต่ำกว่า

มาตรฐานการผลิตทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกลีบเลี้ยงและกลีบรองดอกของกระเจี๊ยบแดงมีสารสีแดงจำพวกแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) จึงทำให้แยมมีสีม่วงแดง นอกจากนี้ยังมีการดอินทรีย์ เช่น กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) กรดซิตริก (Citric acid) กรดมาลิก (Malic acid) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) ที่ทำให้กระเจี๊ยบแดงมีรสเปรี้ยว (13) จากงานวิจัยของนางลักษณ์ (14) ได้ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงลดน้ำตาลโดยค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณกรดจะมีความไวต่ออุณหภูมิในการเก็บรักษา เช่นในแยมสตอเบอร์รี่ที่เก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณกรดในรูปกรดแอสคอร์บิกลดลงร้อยละ 50 แต่เมื่อเก็บแยมสตอเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาณกรดลดลงถึงร้อยละ 70 เมื่อเก็บรักษานาน 28 วัน โดยมีอัตราการสลายเท่ากับ 2.08×10^{-2} ต่อวัน ที่ 4 องศาเซลเซียส และ 4.54×10^{-2} ต่อวัน ที่ 15 องศาเซลเซียส (15) สำหรับปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในรูปกรดซิตริกในผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงลดน้ำตาลมีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ร้อยละ 0.61 ในทุกสูตร ซึ่งมีค่าเท่ากับงานวิจัยนี้ที่มีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้เท่ากับร้อยละ 0.61 ผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงมีลักษณะผิวมันวาวเป็นแผ่นฟิล์มไม่มีน้ำไหลเยิ้มและไม่ตกผลึก เนื้อสัมผัสเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการกระจายตัวของเนื้อกระเจี๊ยบแดงสม่ำเสมอ ในด้านรสชาติมีรสหวานอมเปรี้ยว เมื่อนำไปทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสพบว่าผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงทุกชุดการทดลองไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม (ตารางที่ 4) ดังนั้นการใช้เพคตินจากเปลือกแดงโมอาจเป็นอีกหนทางเลือกในการผลิตแยมกระเจี๊ยบแดงเนื่องจากการใช้เพคตินจากเปลือกแดงโมได้แยมที่มีลักษณะสี กลิ่น รส กลัคล้ายกับเพคตินทางการค้า โดยสามารถใช้เพคตินจากเปลือกแดงโมที่ระดับต่ำสุดร้อยละ 0.10 ในการผลิตแยมได้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเพคตินที่สกัดจากเปลือกแตงโมด้วยกรดไฮโดรคลอริกและน้ำกลั่น เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้า

เพคติน	คุณสมบัติของเพคติน				Degree of Esterification (ร้อยละ)
	ปริมาณเพคติน (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	เมทอกซิล (ร้อยละ)	
เพคตินทางการค้า	-	11.37±0.27 ^a	3.08±0.13 ^c	8.15±0.18 ^c	50.04±1.03 ^c
สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก	16.35±0.35	7.88±0.13 ^b	5.69±0.06 ^b	10.22±0.12 ^b	62.83±0.71 ^b
สกัดด้วยน้ำกลั่น	6.16±0.35	5.69±0.17 ^c	7.82±0.35 ^a	15.30±0.04 ^a	93.73±0.23 ^a

หมายเหตุ: a, b, c แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพของแยมกระเจี๊ยบแดงที่มีปริมาณเพคตินทางการค้าร้อยละ 0.49 (1) และเพคตินจากเปลือกแตงโม ร้อยละ 0.10 (2) 0.49 (3) และ 0.89 (4)

ตารางที่ 2 ลักษณะสีของผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงที่มีปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโม ร้อยละ 0.10 0.49 และ 0.89 เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าร้อยละ 0.49

ปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโม (ร้อยละ)	ค่าสี		
	L* ^{ns}	a* ^{ns}	b* ^{ns}
0.49 (เพคตินทางการค้า)	21.03±0.68	0.40±0.26	2.70±0.12
0.10	20.97±0.43	0.77±0.09	2.90±1.01
0.49	21.73±0.44	0.57±0.12	2.90±0.15
0.89	21.80±0.60	0.37±0.12	2.27±0.03

หมายเหตุ: ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์แยมกระเจียบแดงที่มีปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโม ร้อยละ 0.10 0.49 และ 0.89 เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าร้อยละ 0.49

ปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโม (ร้อยละ)	กรด-ด่าง	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ($^{\circ}$ บริกซ์)	ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (ร้อยละ) ^{ns}
0.49 (เพคตินทางการค้า)	2.42 $\pm$ 0.02 ^a	65.00 $\pm$ 0.58 ^b	0.61 $\pm$ 0.01
0.10	2.24 $\pm$ 0.08 ^b	68.00 $\pm$ 0.58 ^a	0.61 $\pm$ 0.01
0.49	2.32 $\pm$ 0.02 ^{ab}	65.00 $\pm$ 0.58 ^b	0.61 $\pm$ 0.01
0.89	2.26 $\pm$ 0.01 ^b	66.00 $\pm$ 0.58 ^b	0.61 $\pm$ 0.01

หมายเหตุ: ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

a, b หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนั่ง ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แยมกระเจียบแดงที่มีปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโมร้อยละ 0.10 0.49 และ 0.89 เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าร้อยละ 0.49

ปริมาณเพคตินจากเปลือกแตงโม (ร้อยละ)	คุณภาพทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
0.49 (เพคตินทางการค้า)	6.87 $\pm$ 0.17	6.97 $\pm$ 0.19	6.57 $\pm$ 0.20	7.27 $\pm$ 0.17	7.23 $\pm$ 0.20	7.37 $\pm$ 0.16
0.10	6.87 $\pm$ 0.20	7.07 $\pm$ 0.18	6.57 $\pm$ 0.22	7.00 $\pm$ 0.20	7.00 $\pm$ 0.21	7.27 $\pm$ 0.20
0.49	6.90 $\pm$ 0.17	6.97 $\pm$ 0.21	6.63 $\pm$ 0.19	7.30 $\pm$ 0.21	7.00 $\pm$ 0.21	7.10 $\pm$ 0.19
0.89	6.80 $\pm$ 0.19	7.10 $\pm$ 0.18	6.90 $\pm$ 0.18	7.13 $\pm$ 0.21	7.13 $\pm$ 0.20	7.30 $\pm$ 0.19

หมายเหตุ: ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

สรุปผล

จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเพคตินจากเปลือกแตงโมที่สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เปรียบเทียบกับเพคตินทางการค้าพบว่าเพคตินที่สกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีความชื้น ถ้า ปริมาณเมทอกซิลและค่าเอสเทอริฟิเคชัน (Degree of esterification) ใกล้เคียงกับค่าเพคตินทางการค้าจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์แยมกระเจียบแดง ซึ่ง

พบว่าแยมที่ใช้เพคตินทางการค้าและเพคตินที่สกัดได้จากเปลือกแตงโม มีค่าสีและปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้พบว่าแยมกระเจียบแดงที่ใช้เพคตินที่สกัดจากเปลือกแตงโมร้อยละ 0.10 มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำสุด คือ 2.24 และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่าสูงสุด คือ 68 $^{\circ}$ บริกซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในแยมทุกสูตร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายกิตติศักดิ์ อิ่มรุ่งเรือง และ นายสรวิศ ทรัพย์ศาสตร์ นักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารที่ช่วยเหลือทำงานวิจัย และคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้สนับสนุนเงินทุนงบรายได้ ประจำปี 2562 ในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ชานวัฒน์ ลากตันสุภผล, ปฏิมา ทองขวัญ, ศิริลักษณ์ สรพรมทิพย์. การสกัดเพคตินจากเปลือกผักและผลไม้. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2556;44(2) พิเศษ:433-6.
2. ขวัญฤทธิ์ สิทธิดิตรัตน์, พิลานี ไฉนอมสัจย์, จิราพร เชื้อกุล, ปรีศนา สิริอาชา. การผลิตเพคตินจากเปลือกและกากส้มเหลืองทิ้ง. ในรายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 43 วันที่ 1-4 ก.พ. 2548; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: 2548. น. 469-80.
3. สุจิตา ทองคำ. การสกัดเพคตินจากจาวตาลและเมล็ดตาลอ่อน. วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี. 2554;8(1):45-50.
4. มาริษา ไชยโอสถ. การสกัดเพคตินจากของเหลือทิ้งของขนุน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2549.
5. นวลกมล อำนวยสิน, ญัฐยากรณ์ เสือชุมแสง, เทพปัญญา เจริญรัตน์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2561;7(5)ฉบับเสริม:481-90.
6. ขนิษฐา เลิกชัยภูมิ. การสกัดเพคตินจากส้มมะงั่วและการใช้ประโยชน์ในระบบอาหาร วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2545.
7. ณรงค์ ศิริรัมย์. การสกัดและการหาลักษณะของเพคติน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2546.
8. Association of Official Analytical Chemist (AOAC). Official Method of Analysis (15th ed.) Arlington Virginia: Association of Official Analytical Chemist; 1990.
9. Ranganna S. Handbook of Analysis and Quality Control for Fruit and Vegetable Products. Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi, India; 1986.
10. Nwanekezi EC, Alawuba OCG, Mkpolulu, CCM. Characterization of Pectic Substances from Selected Tropical Fruits [Master's thesis]. Abia State Nigeria: Graduated School, Abia State University; 1992.
11. นันทกร บุญเกิด, ลำไพร ดิษฐวิบูลย์. คู่มือการแปรรูปองุ่นและผลไม้อื่นๆ เป็นแยมเจลลี่และน้ำผลไม้พร้อมดื่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา: โอเนลล์ เบสท์ ดีไซน์ แอนด์ พรินติ้ง; 2544.
12. YAPO BM. Pectin quantity, composition and physicochemical behaviour as influenced by the purification process. Food Res Int. 2009;42(8):1197-202.
13. Hussein RM, Shahein YE, Hakim AEE. Awad HM. Biochemical and molecular characterization of three colored types of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). J Am Sci. 2010;6:726-33.
14. นงลักษณ์ งามพิระพงศ์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์แยมกระเจี๊ยบแดงลดน้ำตาล วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2557.

15. Patras A, Brunton NP, Tiwari BK, Butler F.
Stability and degradation kinetics of
bioactive compounds and colour in
strawberry jam during storage. Food and
Bioprocess Tech. 2011;4:1245-52.



การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิดินเพื่อเพาะกล้าไม้เบญจมาศ

Development of a Mathematical Model to Predict Soil Temperature for the Growth of Chrysanthemum Sprouts

จักรวาล บุญหวาน^{1*} มานพ แยมแฟง¹ ศิริชัย เทพา¹ ธนาพล สุขชนะ¹ พิมพพรรณ ปรีองาม¹ รัตนชัย ไพรินทร์² และ มนพร คุปตาสา³

Chakkawan Boonwan^{1*}, Manop Yamfang¹, Sirichai Thepa¹, Thanaphol Sukchana¹, Pimpan Pruengam¹, Rattanachai Pairintra² and Manaporn Kuptasa³

¹สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

²สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

³สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

¹Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

²Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

³Division of Manufacturing Systems Engineering, School of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 17 April, 2020

Revised: 26 May, 2020

Accepted: 9 June, 2020

Available online: 12 June, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.7

This research is the development of a mathematical model to predict soil temperature for the growth of chrysanthemum sprouts compared with experimental results because the soil temperature affects the growth of chrysanthemum sprouts. The solar radiation panel is 55x220 cm. The soil container is 1 m² which contains 10 cm tall sprout soil. The temperature measurement of the first soil layer is attached to the heating plate below. The second soil layer is higher than the first soil layer 5cm and the third soil layer is higher than the heating unit 10 cm. The comparison of water

Keywords: mathematical model, solar water heating system, solar radiation panel, soil temperature, chrysanthemum temperature from the solar radiation panel and the water temperature in the heat accumulator tank between experiment results and mathematical models is found that the average errors are 0.1 °C and 0.17 %, respectively. In case soil temperature fluctuates with time for the second and third soil layer and the initial water temperature used each time is 40 °C and 60 °C without temperature control, which will allow the temperature to decrease naturally in order to study the increase and decrease of night-time soil temperature between the results of the experiment and mathematical models, it is discovered that the errors are 0.7 °C and 1.4 °C, respectively. When the soil properties are changed by the heat capacity, considering only the terms of Clay and Water Content and comparing the experiments with mathematical models of soils 2 and 3, it is found that the temperature have the average errors of 3.5 °C and 3.5 °C, respectively. For the case of keeping the water temperature in the heat accumulator tank constant, not changing with time, and determining the change in soil temperature in 2D form by specifying that the soil temperature in the first layer is constant at 48 °C and the air temperature is at 28 °C, all of which are as input in mathematical models. It is found that soil temperatures are obtained from the mathematical model are higher than the measured values of 0.82 °C and 2 °C of soil layer 2 and 3, respectively.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิดินมีผลต่อการเจริญเติบโตของกล้าไม้เบญจมาศ โดยแผงรับรังสีอาทิตย์เพื่อทำน้ำร้อนขนาด 55×220 cm ภาชนะบรรจุดินมีขนาด 1 m² บรรจุดินเพาะกล้าไม้สูง 10 cm การวัดอุณหภูมิดินชั้นที่หนึ่งซึ่งติดกับแผ่นให้ความร้อนด้านล่างดินชั้นที่สองจะสูงกว่าดินชั้นที่หนึ่ง 5 cm และดินชั้นที่สามสูงกว่าชุดให้ความร้อน 10 cm เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่

0.1 °C และ 0.17 % ตามลำดับ กรณีอุณหภูมิแปรผันตามเวลาของดินชั้นที่สองและดินชั้นที่สาม โดยอุณหภูมินี้เริ่มต้นที่ใช้แต่ละครั้งคือ 40 และ 60 °C โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะปล่อยให้อุณหภูมิลดลงตามธรรมชาติเพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิดินในเวลากลางคืนระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า มีความคลาดเคลื่อน 0.7 °C และ 1.4 °C ตามลำดับ เมื่อคุณสมบัติของดินเปลี่ยนแปลงโดยค่าความจุความร้อนพิจารณาเฉพาะเทอมของ Clay และ Water Content จากการเปรียบเทียบการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดินชั้นที่ 2 และ 3 พบว่าอุณหภูมิดินมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.5 °C และ 3.5 °C ตามลำดับ สำหรับกรณีรักษาอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนที่ไม่แปรผันตามเวลา กำหนดให้การเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิในดินพิจารณาแบบ 2 มิติ โดยกำหนดอุณหภูมิดินในชั้นที่ 1 คงที่ อุณหภูมิ 48 °C และอุณหภูมิอากาศที่ 28 °C เป็นอินพุต ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สูงกว่าค่าที่วัดได้ 0.82 °C และ 2 °C ของดินชั้นที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำนํ้าร้อน รังสีอาทิตย์ แผงรับรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิดิน เบญจมาศ

บทนำ

เบญจมาศเป็นไม้ตัดดอกที่ได้รับความนิยมแพร่หลายทั่วโลกมีปริมาณการผลิตและมูลค่าการจำหน่ายสูง โดยเฉพาะประเทศเนเธอร์แลนด์ซึ่งเป็นทั้งผู้ผลิตและผู้ส่งออกรายใหญ่ของโลก รวมทั้งประเทศในแถบยุโรป อเมริกา ญี่ปุ่น ฯลฯ ประเทศผู้ผลิตเหล่านี้จะมีปัญหาเรื่องสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็น การปลูกไม้ดอกที่มีคุณภาพจำเป็นต้องปลูกในโรงเรือน ดังนั้นทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงมาก หากประเทศไทยนำข้อได้เปรียบทางสภาพภูมิประเทศที่สามารถปลูกเบญจมาศได้ดี ในสภาพธรรมชาติที่เหมาะสม เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะสามารถผลิตเบญจมาศแข่งขันกับตลาดไม้ดอกของโลกได้ โดยภูมิประเทศที่เหมาะสมที่จะส่งเสริมให้มีการเพาะปลูกเพื่อการพาณิชย์ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย เบญจมาศเป็นพืชวันสั้น ดอกจะพัฒนาหากช่วงเวลากลางวันสั้นกว่า 13.5 ชั่วโมง โดยสภาพอากาศที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิอากาศในช่วงเวลากลางคืนอยู่ระหว่าง 17 – 20 °C การขยายพันธุ์เบญจมาศนั้น อุณหภูมิดินมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะถ้าไม่เบญจมาศต้องการอุณหภูมิดินที่ประมาณ 20 °C เพื่อการออกรากพันกิ่งชำ นอกจากนี้อุณหภูมิดินยังมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชอีกหลายชนิด ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของพืชจะอยู่ระหว่าง 15 – 35 °C

ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 35 °C จะทำให้อัตราการหายใจของรากพืชหายใจเร็วขึ้น (1) ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 4 °C จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของรากช้าลง (2) มีการศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่น และความชื้นว่ามีผลต่อความจุความร้อน และค่าการนำความร้อน พบว่าเมื่อความหนาแน่นและความชื้นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าความจุความร้อนและค่าการนำความร้อนของดินมากขึ้น (3) การใช้ความสัมพันธ์หรือความคล้ายคลึงของวงจรทางความร้อนและไฟฟ้าสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้า ทำการคำนวณเพื่อทำนายอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ เมื่อได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้ ในการทดลองใช้ดินทรายใส่ลงไปในท่อพลาสติกครึ่ง 1 m ลึก 90 cm ทำการวัดอุณหภูมิที่ระดับความลึก 5 20 35 และ 50 cm ตามลำดับ การใช้แบบจำลองทำนายโดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์เป็นสัญญาณอินพุต จากการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง พบว่า เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความชื้นในดินซึ่งแปรผันตามความลึก ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 °C (4) การใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิดิน เพื่อประมาณการระเหยของน้ำรายวัน ด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิผิวแทนค่า Sensible Heat Flux และใช้สัมประสิทธิ์ Empirical คำนวณหา Flux ของพลังงานตลอดวันเป็นรายชั่วโมงจากอุณหภูมิเฉลี่ยและความร้อนที่ที่ดินได้รับนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การระเหยตัว ในการทดลองใช้ดินผสมทราย 96 % ความพรุน 0.4 ความหนาแน่นรวม 1,430 kg/m³ บรรจุในท่อพลาสติกขนาด 30 cm พื้นที่หน้าตัด 706 cm² ลึก 110 cm ฝังอยู่ในดินด้านบนเปิดออกสู่บรรยากาศติดตั้งห่างกัน 5 m ผลต่างอุณหภูมิจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทการระเหยน้ำของดินที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 ที่ดินเปียกและเท่ากับ 1 ที่ดินแห้ง สำหรับค่าที่วัดได้จาก Lysimeter

เป็น 0.2 ในดินเปียก และ 0.8 ในดินแห้ง ซึ่งค่าที่ได้ก็ให้ค่าที่แม่นยำเพียงพอต่อการนำไปใช้ (5) การสร้างแบบจำลองใน 2 มิติ เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นในดินที่ถูกให้ความร้อนด้วยอากาศร้อนที่ปล่อยออกมาจากท่อ โดยใช้หลักการของการแพร่ความร้อนและความร้อนมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในแบบ 2 มิติ พบว่าที่ผิวดินจะแม่นยำมากที่สุด โดยมีความแม่นยำถึง 97 % ส่วนการถ่ายเทมวล 92 % (6)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศ โดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ทำน้ำร้อนเพื่อนำไปทดสอบการให้ความร้อนดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศจากด้านล่างขึ้นไปด้านบน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกล้าไม้เบญจมาศ โดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งมีวิธีการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

การวิเคราะห์สมบัติของดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินผสมเพื่อการปลูกไม้ดอก เป็นดินที่บรรจุถุงขายขนาดถุงละ 10 kg ในชื่อทางการค้า “ดินลำตวน” ดินตัวอย่างจะถูกบรรจุลงในภาชนะที่มีมิติชัดเจนและถูกส่งไปวิเคราะห์ที่ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งถ้าชนิดของดินเพาะกล้าไม้มีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงตามสมบัติของดิน โดยผลการวิเคราะห์ดินตัวอย่างมีองค์ประกอบดังนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของดิน

ส่วนผสม	ดินที่ใช้	ดิน
	ทดลอง	ทั่วไป*
Sand (% by vol.)	40	24
Silt (% by vol.)	26	19
Clay (% by vol.)	34	57
Water Content (% by mass)	63.5	4
Organic Matter (% by mass)	17.3	-

* ดินทั่วไป เป็นดินที่เก็บตัวอย่างดินจากบริเวณคณะพลังงานและวัสดุ

ตารางที่ 2 สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

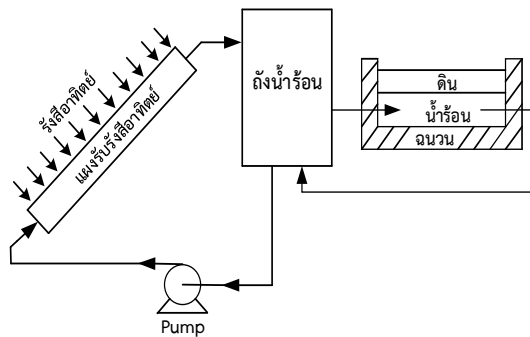
ส่วนผสม	ดินที่ใช้	ดิน
	ทดลอง	ทั่วไป*
Bulk density (kg/m ³)	618	1,187
Water Content (%)	63.5	4
Porosity (%)	76.67	55.2
Thermal Conductivity (W/m°C)	0.662	0.817
Heat Capacity (MJ/m ³ °C)	2.02	1.579
Thermal diffusivity (m ² /s)	3.297 x 10 ⁻⁷	5.174 x 10 ⁻⁷

* ดินทั่วไป เป็นดินที่เก็บตัวอย่างดินจากบริเวณคณะพลังงานและวัสดุ

การทดลองการให้ความร้อนดินด้วยแผ่นความร้อน

ในการทดลองให้ความร้อนแก่ดินโดยจ่ายน้ำเข้าสู่แผงรับรังสีอาทิตย์ด้วยอัตราการไหลคงที่ เข้าสู่แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ 750 cm³/min วัดอุณหภูมิน้ำเข้า - ออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ วัดอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนและวัดค่ารังสีที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีอาทิตย์ โดย

แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้มีขนาด 55×220 cm วางหันหน้าไปทางทิศใต้ทำมุม 14° กับแนวระดับเพื่อทำน้ำร้อนไปให้ความร้อนแก่ดินเพาะกล้าไม้จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนในชุดให้ความร้อนดิน ดังรูปที่ 1 ซึ่งการนำน้ำร้อนที่ได้จากพลังงานรังสีอาทิตย์ไปใช้ในการให้ความร้อนแก่ดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศเป็นการนำพลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดมาใช้ให้เกิดประโยชน์



รูปที่ 1 ระบบให้ความร้อนดิน

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

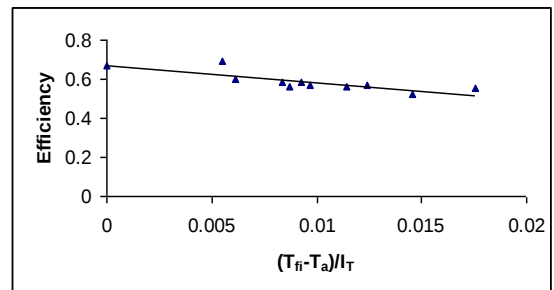
1. เครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยใช้ Data Logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL840 เมื่อนำไปใช้กับสาย Thermocouple Type K มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.8^\circ\text{C}$
2. สาย Thermocouple Type K
3. เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ Pyranometer ยี่ห้อ EKO รุ่น ML-01 มีค่าความคลาดเคลื่อน $< 3\%$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การหาสมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์

ทำการวัดอุณหภูมิเข้า - ออกจากแผงรับรังสีเพื่อคำนวณความร้อนใช้ประโยชน์ (Q_U) วัดค่ารังสีที่ตกกระทบพื้นเอียง (I_T) และวัดอุณหภูมิแวดล้อมนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนรูปจากรังสีอาทิตย์ไปเป็นความร้อน $F_R(\tau\alpha)$ และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$) จากรูปที่ 2 ได้ $F_R U_L = 8.597 \text{ W/m}^2\text{C}$ และ

$F_R(\tau\alpha) = 0.6693$ ในขณะทำการทดสอบอัตราการไหลของน้ำเข้าแผงด้วยอัตรา 0.75 l/min อุณหภูมิน้ำเข้า - ออกแผงมีความแตกต่างเฉลี่ยที่ 12°C ความร้อนใช้ประโยชน์ 626.03 W ด้วยรังสีที่ตกกระทบพื้นเอียงอัตรา 907.35 W/m^2 และแผงรับรังสีมีประสิทธิภาพเฉลี่ยรายวันที่ 58.03%



รูปที่ 2 สมรรถนะของแผงรับรังสีอาทิตย์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานรังสีอาทิตย์

1. พิจารณาแผงรับรังสีอาทิตย์



รูปที่ 3 สมดุลความร้อนที่แผงรับรังสีอาทิตย์

จากรูปที่ 3 สมการสมดุลความร้อน

$$A_c [F_R(\tau\alpha)I_T] + \dot{m}_w c_p T_{f,i} = \left[A_c [F_R U_L (T_{f,i} - T_a)] + \dot{m}_w c_p T_{f,o} \right] \quad (1)$$

ดังนั้น

$$T_{f,o} = T_{f,i} + \frac{A_c [F_R(\tau\alpha)I_T - F_R U_L (T_{f,i} - T_a)]}{\dot{m}_w c_p} \quad (2)$$

โดยที่

A_c = พื้นที่รับแสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี (m^2)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kgK)

F_R = ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Dimensionless)

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

I_T = รังสีจากแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนตัวเก็บรังสี (W/m²)

T_a = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

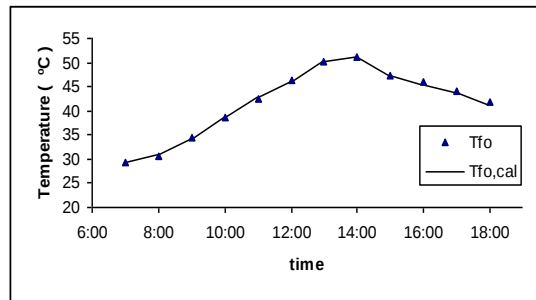
$T_{f,i}$ = อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าตัวเก็บรังสี (°C)

$T_{f,o}$ = อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกตัวเก็บรังสี (°C)

U_L = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสี (W/m²°C)

τ = ค่าสภาพส่งผ่าน (Transmissivity) ของกระจกมีค่าประมาณ 0.85 (Dimensionless)

α = ค่าสภาพดูดกลืน (Absorptivity) ของผิวสีดำด้านมีค่าประมาณ 0.96 (Dimensionless)



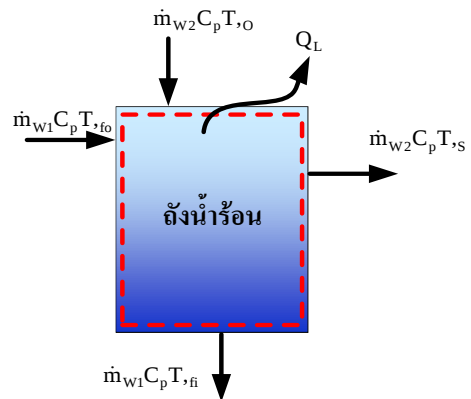
รูปที่ 4 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองจ่ายน้ำเข้าสู่แผงรับรังสีด้วยอัตรา 9 l/min มีปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนพื้นเอียงเฉลี่ยที่ 628.31 W/m² ความร้อนที่ใช้ประโยชน์โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 393.86 W เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีจากค่าที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยที่ 0.1 °C ดังรูปที่ 4

2. พิจารณาสภาวะสมดุลความร้อน

จากรูปที่ 6 อุณหภูมิในถังสะสมความร้อนซึ่งได้จากการวัดและแบบจำลองพบว่ามีคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 0.17 % สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในถังสะสมความร้อน พบว่าในรอบวันอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 29 °C เป็น 40 °C จากเวลาเริ่มต้น 8.00 น. ถึง 18.00 น. โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 47.73 °C ในเวลา 14.00 น.

จากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีอุณหภูมิสุดท้ายที่ 40.7 °C ที่เวลา 18.00 น.



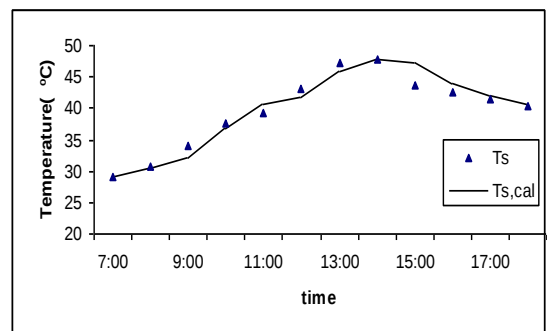
รูปที่ 5 สมดุลความร้อนที่ถังสะสมความร้อน

จากรูปที่ 5 สมการสมดุลความร้อน

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \left[\dot{m}_{w1} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) - \dot{m}_{w2} (T_s - T_o) \right] - UA_s (T_s - T_a) \quad (3)$$

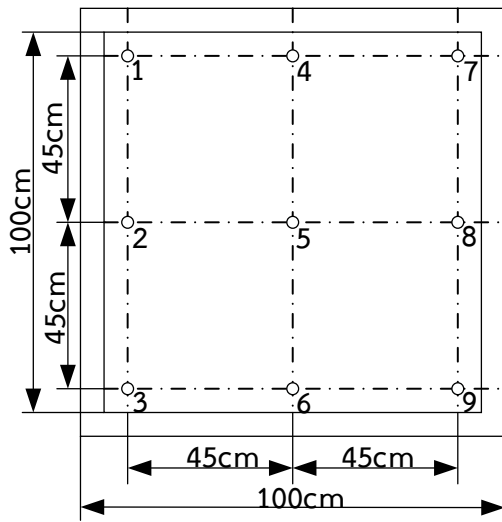
ดังนั้น

$$T_{s1+} = T_{s1} + \frac{\Delta t}{\dot{m}_w C_p} \left[\dot{m}_{w1} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) - \dot{m}_{w2} C_p (T_s - T_o) - UA_s (T_s - T_a) \right] \quad (4)$$



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินเมื่อได้รับความร้อนจากแผ่นความร้อน



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านหน้า

รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในแต่ละชั้น

การทดลองจะบรรจุดินลงในชุดให้ความร้อนดิน ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1 m^2 ดินมีความสูง 10 cm ซึ่งในการเลือกกระตบความลึกที่ 10 cm เนื่องจากรากของกล้าไม้เบญจมาศจะมีความยาวอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 cm และการให้ความร้อนชั้นที่ติดกับแผ่นความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงอาจเป็นอันตรายต่อกล้าไม้ได้โดยดินจะรับความร้อนจากด้านล่างขึ้นด้านบน ดังรูปที่ 7 (ข) ในการติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิดินจะติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิโดยแบ่งดินออกเป็น 3 ชั้น คือชั้นที่ 1 เป็นชั้นที่สัมผัสกับแผ่นความร้อน ชั้นที่ 2 คือชั้นดินที่มีความหนา 5 cm ชั้นที่ 3 คือที่ผิวดิน และในแต่ละชั้นจะทำการวัดอุณหภูมิ 9 ตำแหน่ง ขณะที่ทำการบรรจุดินลงในชุดให้ความร้อนจะทำการชั่งน้ำหนักดินเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน ตำแหน่งที่ติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 7 (ก)

ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนในดินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิดินในชั้นต่างๆ เพื่อที่จะหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการประเมินสภาวะการทำงานที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมอุณหภูมิดิน ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะพิจารณาทั้งที่สภาวะคงตัวและไม่คงตัวแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

1. กรณีอุณหภูมิดินแปรผันตามเวลาหรือที่สภาวะไม่คงตัว

การทดลองโดยจ่ายน้ำที่อุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 40 และ 60 °C โดยจะปล่อยให้ น้ำในถังสะสมความร้อนลดลงตามธรรมชาติ ซึ่งจะศึกษาถึงอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิดินในเวลากลางคืน ในการสร้างแบบจำลองพิจารณาการแพร่ของความร้อนจากชั้นดินจากด้านล่างสู่ด้านบน โดยจัดสมการในรูปของ Finite Difference ดังสมการที่ (5) และ (6) เป็นการนำความร้อนแบบ 1 มิติ ซึ่งการนำความร้อนจะเกิดขึ้นในแกน z เท่านั้น

$$T(z, t + \Delta t) - T(z, t) = \alpha \frac{d^2 T}{dz^2} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$T(z, t + \Delta t) = T(z, t) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta z^2} \left[\begin{matrix} T(z + \Delta z, t) \\ -2T(z, t) + \\ T(z - \Delta z, t) \end{matrix} \right] \quad (6)$$

โดยค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ (Thermal Diffusivity Constant) หาได้จากสมการที่ (7)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (7)$$

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

k = ค่าการนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)

ρ = ความหนาแน่น (kg/m^3)

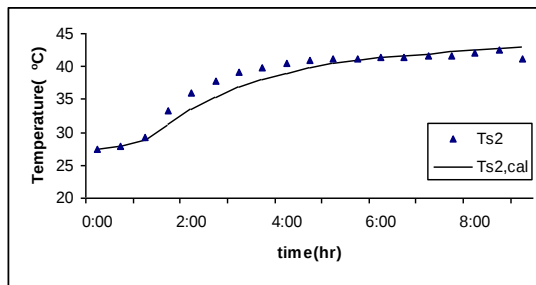
โดยค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณมาจากตารางที่ 2

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่ $z = 0$

$$T_1 = \left[\begin{aligned} & (7 \times 10^{-6} T_w^2 - 0.0009 T_w + 0.0243) t^2 \\ & + (-6 \times 10^{-5} T_w^2 + 0.01 T_w - 0.1967) t \\ & + (-0.0095 T_w^2 + 0.9716 T_w + 2.3899) \end{aligned} \right] \quad (8)$$

ที่ $z = 15 \text{ cm}$, $T = T_a = 28.7^\circ \text{C}$ เมื่อ $t = \text{เวลา (min)}$

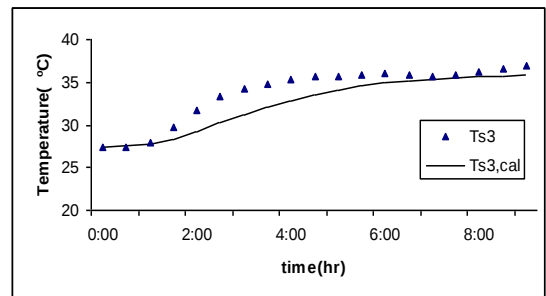
และ $\Delta t = \text{time step ที่ } 600 \text{ sec}$



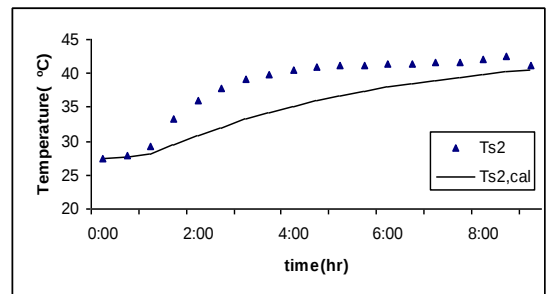
รูปที่ 8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินชั้นที่ 2 ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิดินในชั้นที่ 2 โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับแบบจำลองที่ได้จากวิธี Parabolic Finite Difference โดย time step ทุก 10 นาที พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 0.7°C เป็นเพราะสมบัติของดินมีความถูกต้องแม่นยำ การคำนวณค่าสมบัติทางความร้อนของดินคำนวณจากองค์ประกอบทุกค่าของดินทั้ง Sand Silt Clay และ Water Content นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในดินไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ในลักษณะของการนำความร้อน ความร้อนแฝงไม่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเมื่อให้ความร้อนจากด้านล่างของดิน จากรูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิดินในชั้นที่ 3 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้กับแบบจำลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 1.4°C โดยความคลาด

เคลื่อนที่มากจะอยู่ในช่วงชั่วโมงที่ 2 ถึงชั่วโมงที่ 4 ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซึ่งในแบบจำลองจะเป็น Polynomial Degree 2 ซึ่งจะทำให้ความชันมีค่าต่ำ อีกทั้งในชั้นที่ 3 ยังเป็นชั้นผิวดินซึ่งจะมีผลกระทบจากการพาความร้อนจากอากาศแวดล้อม การระเหยและการแผ่รังสี ซึ่งในแบบจำลองจะไม่นำมาคิด แต่จะพิจารณาความร้อนที่ผิวดินด้วยกระบวนการนำความร้อนแทน



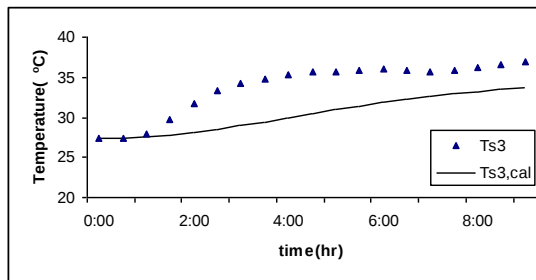
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินชั้นที่ 3 ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 10 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินชั้นที่ 2 ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อคุณสมบัติของดินเปลี่ยนไป

จากรูปที่ 10 กรณีที่เปลี่ยนวิธีคำนวณสมบัติของดินโดยค่าความจุความร้อนพิจารณาเฉพาะathom ของ Clay และ Water Content และในค่าการนำความร้อนก็เช่นเดียวกัน พบว่าในช่วงชั่วโมงที่ 2 ถึงชั่วโมงที่ 8 จะมีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 3.5°C เมื่อเข้าสู่สภาวะคง

ตัวความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงซึ่งที่สภาวะคงตัว ความคลาดเคลื่อนเหลือเป็น 0.5°C สาเหตุความคลาดเคลื่อนเพราะสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณ Clay ไม่มากนักคือมีเพียง 34 % และถ้าดินมีความชื้นต่ำก็จะให้ค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะว่าดินที่ใช้ในการทดลองตัว Clay ไม่ใช่นัยสำคัญของดินแต่เป็นความชื้นซึ่งมีค่ามากกว่าถึง 63.5 %



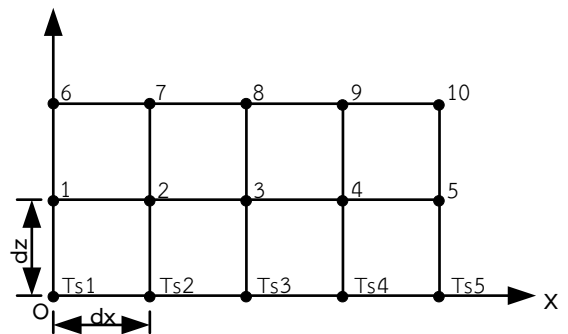
รูปที่ 11 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินชั้นที่ 3 ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อคุณสมบัติของดินเปลี่ยนไป

จากรูปที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิดินในชั้นที่ 3 ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากแบบจำลองพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชั้นที่ 2 โดยคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 3.5°C โดยคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ชั่วโมงที่ 2 ถึงชั่วโมงที่ 6 ซึ่ง คลาดเคลื่อนอยู่ $5 - 6^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ดินไม่ได้มี Clay เป็นองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญ และดินชั้นที่ 3 มีการถ่ายเทความร้อนอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น การพาความร้อนจากอากาศแวดล้อม การระเหยและการแผ่รังสี จึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนมาก และในช่วงสภาวะคงตัวมีความคลาดเคลื่อนที่ 3°C

2. กรณีรักษาอุณหภูมิน้ำในถังสะสมความร้อนคงที่อุณหภูมิดินไม่แปรผันตามเวลา

ในการทดลองโดยการจ่ายน้ำเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินที่อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 60 50 และ 40°C จ่ายเข้าสู่ชุดให้ความ

ร้อนโดยจะรักษาอุณหภูมิน้ำร้อนให้คงที่ เมื่อดินได้รับความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิเข้าใกล้แผ่นความร้อนแล้ว กระบวนการแพร่ความร้อนในดินจะสิ้นสุดลงเข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิดินจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดิน แบบ 3 มิติ โดยแกน z คือ ความสูงของชั้นดินส่วนแกน x และแกน y จะเป็นระนาบของดินซึ่งมีขนาดเท่ากัน ดังรูปที่ 12



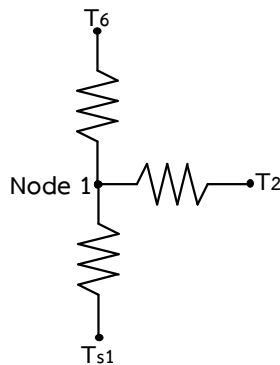
รูปที่ 12 ตำแหน่งของดินที่พิจารณา

โดยที่ $\Delta x = \Delta y = 10\text{ cm}$ และ $\Delta z = 5\text{ cm}$

สมมติฐาน

1. เป็นการนำความร้อน 3 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัว
2. ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในดิน
3. สมบัติทางฟิสิกส์ของดินทั้งความหนาแน่น ค่าการนำความร้อนและความชื้นมีค่าคงที่
4. พิจารณาเนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกัน

พิจารณาที่ Node 1



รูปที่ 13 ตำแหน่งของดินพิจารณา Node ที่ 1

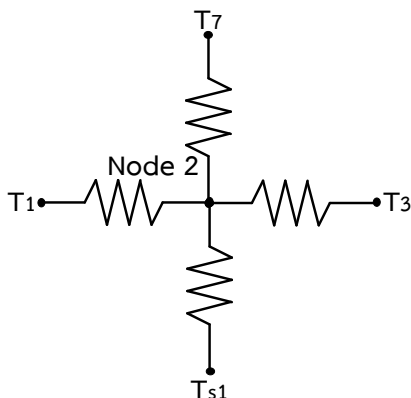
สมการสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 13

$$\left[\frac{T_6 - T_1}{\Delta z / k [\Delta y \times (\Delta x / 2)]} \right] + \left[\frac{T_2 - T_1}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_{s1} - T_1}{\Delta z / k [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] = 0 \quad (9)$$

ในการทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุดที่ 5 จะได้

$$\left[\frac{T_4 - T_5}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_{10} - T_5}{\Delta z / k [\Delta y \times (\Delta x / 2)]} \right] + \left[\frac{T_{s5} - T_5}{\Delta z / k [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] = 0 \quad (10)$$

พิจารณาที่ Node 2 ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ตำแหน่งของดินพิจารณา Node ที่ 2

สมการสมดุลความร้อน

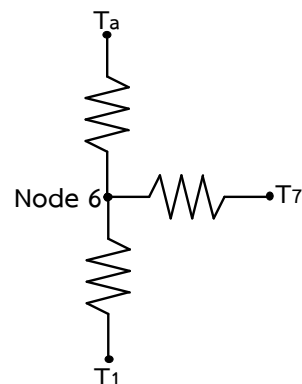
$$\left[\frac{T_1 - T_2}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_7 - T_2}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_3 - T_2}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_{s2} - T_2}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (11)$$

ในการทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุดที่ 3 และ 4 จะได้

$$\left[\frac{T_2 - T_3}{\Delta x / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_8 - T_3}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_4 - T_3}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_{s3} - T_3}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (12)$$

$$\left[\frac{T_3 - T_4}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_9 - T_5}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_5 - T_4}{\Delta x / k (\Delta z \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_{s4} - T_4}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (13)$$

พิจารณาจุดที่ 6 ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตำแหน่งของดินพิจารณา Node ที่ 6

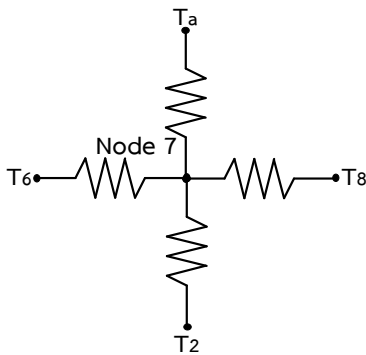
สมการสมดุลความร้อน

$$\left[\frac{T_1 - T_6}{\Delta z / k [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_7 - T_6}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_9 - T_6}{1/h [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] = 0 \quad (14)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุดที่ 10 จะได้

$$\left[\frac{T_9 - T_{10}}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_5 - T_{10}}{\Delta z / k [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_9 - T_{10}}{1/h [(\Delta x / 2) \times \Delta y]} \right] = 0 \quad (15)$$

พิจารณาจุดที่ 7 ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ตำแหน่งของดินพิจารณา Node ที่ 7 สมการสมดุลความร้อน

$$\left[\frac{T_6 - T_7}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_8 - T_7}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_2 - T_7}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (16)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนที่จุดที่ 8 และ 9 จะได้

$$\left[\frac{T_7 - T_8}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_9 - T_8}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_3 - T_8}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_9 - T_8}{1/h (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (17)$$

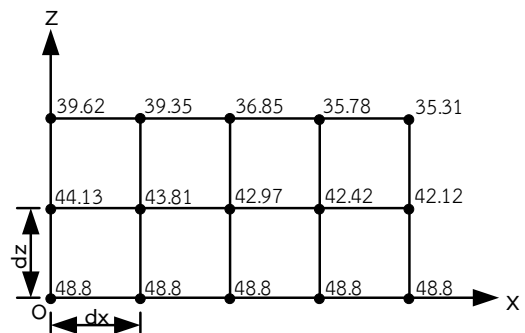
$$\left[\frac{T_8 - T_9}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_{10} - T_9}{\Delta x / k [(\Delta z / 2) \times \Delta y]} \right] + \left[\frac{T_4 - T_9}{\Delta z / k (\Delta x \times \Delta y)} \right] + \left[\frac{T_a - T_9}{1/h (\Delta x \times \Delta y)} \right] = 0 \quad (18)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยสมหาได้จากสมการที่ (19)

$$h = 2.8 + 3V \quad (19)$$

โดยที่ V = ความเร็วลม (m/s)

เมื่อได้สมการสมดุลความร้อนของทั้ง 10 จุด ทำการแก้สมการหาอุณหภูมิในแต่ละจุดจะได้อุณหภูมิ ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดิน 2 มิติ

จากรูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในดินที่ถูกให้ความร้อนเมื่อพิจารณาแบบ 2 มิติ ซึ่งเป็นการพิจารณาภายใต้สภาวะคงตัว โดยกำหนดอุณหภูมิดินในชั้นที่ 1 คงที่ อุณหภูมิ 48 °C และอุณหภูมิอากาศที่ 28 °C เป็นอินพุตในแบบจำลอง และ คำนวณสัมประสิทธิ์การ

พาความร้อนที่ผิวดินคือ $7.3 \text{ W/m}^2\text{C}$ ด้วยความเร็วลมเฉลี่ยที่ 1.5 m/s (7) พบว่า อุณหภูมิดินในชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ $43.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สูงจากค่าที่วัดได้ $0.82 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าที่วัดได้คือ $42.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนอุณหภูมิดินในชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ $37.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สูงกว่าค่าที่วัดได้อยู่ $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เหตุที่อุณหภูมิดินในชั้นที่ 3 มีความคลาดเคลื่อนมาก เป็นเพราะในดินมีกลไกการถ่ายเทความร้อนอื่นร่วมด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพาความร้อนในชั้นดินที่มีความพรุนมาก ๆ จะทำให้การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในดินด้วยการนำความร้อนมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

สรุปผล

การเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์และถึงสะสมความร้อนระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยที่ $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 0.17% ตามลำดับ เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้กระถางอุณหภูมิดินแปรผันตามเวลาหรือที่สภาวะไม่คงตัวกับการทดลองของดินชั้นที่ 2 ซึ่งมีระยะสูงกว่าชุดให้ความร้อน 5 cm และดินชั้นที่ 3 มีระยะสูงกว่าดินชั้นที่ 2 อยู่ 5 cm หรือสูงกว่าชุดให้ความร้อน 10 cm โดยอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 40 และ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า มีความคลาดเคลื่อน $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินพบว่า อุณหภูมิดินชั้นที่ 2 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ $3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือ $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับดินชั้นที่ 3 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ $3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือ $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับกรณีรักษาอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนคงที่ อุณหภูมิดินไม่แปรผันตามเวลา อุณหภูมิดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดินชั้นที่ 2 และ 3 สูงจากค่าที่วัดได้ $0.82 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอขอบคุณสายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Krutkun T. Sustainable agriculture use of soil fertilizer. 1st ed. Bangkok: Green fence; 1997.
2. Feungchan S. Fruit tree physiology. 1st ed. Bangkok: Sirakan Offset; 1994.
3. Scott HD. Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications. 1st ed. Library of Congress cut a logging Iowa State: Wiley-Blackwell; 2001.
4. Dardo O, Jorge L, Leonardo P. Predicting Temperature and Heat flow in a Sandy Soil by Electrical Modeling. Soil Sci Soc Am J. 2001;65(4):1074-80.
5. Gua YQ, Asher JB, Yano T, Momii K. Estimation of Soil Evaporation Using the Differential Temperature method. Soil Sci Soc Am J. 1999;63(6):1608-14.
6. Kurpaskaz S, Slipek L. Mathmatical Model of Heat and Mass Exchange in a Garden Subsoil during Warm air heating. J Agr Eng Res. 1996;65(4):305-11.
7. Duffie JA, Beckman WA, Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd ed. New York: John Wiley & Son; 1991.



การพัฒนาอุปกรณ์อย่างง่ายที่อาศัยการแพร่ของแก๊สกับกระดาษที่ตรึงด้วยรีเอเจนต์ธรรมชาติและการวิเคราะห์ค่าสีจากภาพถ่ายดิจิทัลสำหรับวิเคราะห์แอมโมเนีย

Development of Simple Device based on Gas Diffusion with Natural Reagent Immobilized Paper and Digital Image Colorimetry for Ammonia Determination

นภาพร วรรณพรม และ เยาวลักษณ์ ขันหัวโทน*

Napaporn Wannaprom and Yaowalak Khanhuathon*

สาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย อ.เมือง จ.เชียงราย 57100

Chemistry Program, Faculty of Education, Chiang Rai Rajabhat University, Mueang, Chiang Rai 57100, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 29 April, 2020

Revised: 26 May, 2020

Accepted: 19 June, 2020

Available online: 23 June, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.8

Keywords: ammonia gas, simple gas detection device, natural reagent, digital image colorimetry

This research has developed a simple device based on gas diffusion with natural reagent immobilized on paper for ammonia determination and colorimetric detection via smart phone. The proposed method based on the reaction between ammonium chloride and sodium hydroxide to provide ammonia gas in reaction chamber, after that this gas was diffused through immobilized paper with natural reagent then the colorimetric change on the paper was measured with a smart phone. Three kinds of natural reagent (Red cabbage, orchid flower and butterfly pea flower) were investigated for suitability of immobilized on paper. The result found that the highest sensitivity was obtained with red cabbage extracts immobilized paper. The various parameters were studied for optimum condition of ammonia determination. The suitable parameter values were 4 % w/v of red cabbage extracts concentration. Time of extraction, immobilization on paper and reaction were 15, 5 and 3 minutes, respectively. Under optimum condition, the linearity range was 1.00–30.00 mM ammonium chloride ($y = 1.31 \pm 0.03x + 15.34 \pm 0.59$, $R^2 = 0.9955$) with limit of detection and limit of quantitation were 0.24 and 0.81 mM, respectively. The precision of proposed method were studied; the results

found that %RSD were less than 5 % and %recovery were found in the range of 96.8–107.0 %. The developed device was successfully applied for ammonia determination in chemical fertilizer samples. The proposed method was compared with standard method. It was found that both methods agree well with not significant different at 95 % interval levels. The developed gas detection device has many advantages such as cost-effective, simple, using natural reagent and portable device.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อย่างง่ายที่อาศัยการแพร่ของแก๊สกับกระดาษที่ตรึงด้วยรีเอเจนต์ธรรมชาติสำหรับวิเคราะห์แอมโมเนียและตรวจวัดค่าสีด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมคลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดเป็นแก๊สแอมโมเนีย ซึ่งจะระเหยไปทำปฏิกิริยากับแผ่นกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากพืชธรรมชาติ และวัดค่าความเข้มสีบนกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ การศึกษาชนิดของสารสกัดจากพืชธรรมชาติ 3 ชนิด (กะหล่ำปลีแดง ดอกกัลยาไม้ และดอกอัญชัน) สำหรับตรึงบนกระดาษ พบว่าสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงให้ค่าสภาพไววิเคราะห์ที่สูงที่สุด ทำการ ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนีย ค่าตัวแปรที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของกะหล่ำปลีแดง 40 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เวลาในการสกัดสาร การตรึงสาร และการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 15, 5 และ 3 นาที ตามลำดับ ภายใต้ภาวะการทดลองที่เหมาะสมแสดงช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 1.00–30.00 มิลลิโมลาร์ แอมโมเนียมคลอไรด์ ($y = 1.31 \pm 0.03x + 15.34 \pm 0.59$, $R^2 = 0.9955$) โดยมีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดจำกัดการวิเคราะห์ปริมาณเท่ากับ 0.24 และ 0.81 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ค่าความแม่นยำของวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นน้อยกว่า 5.0 %RSD และค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 96.8–107.0 % อุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นประสบความสำเร็จสำหรับประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างปุ๋ยเคมี เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน พบว่าทั้ง 2 วิธีให้ผลการทดลองที่

สอดคล้องกันอย่างไม่มีความสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่ได้พัฒนาขึ้น ราคาไม่แพง ง่ายต่อการวิเคราะห์ ใช้รีเอเจนต์ธรรมชาติ และสามารถวิเคราะห์นอกสถานที่ได้

คำสำคัญ: แก๊สแอมโมเนีย อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สอย่างง่าย สารสกัดจากธรรมชาติ การวิเคราะห์ค่าสีจากภาพถ่ายดิจิทัล

บทนำ

ไนโตรเจนเป็นธาตุสำคัญธาตุหนึ่งของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดนิวคลีอิก โปรตีน ยูเรีย เป็นต้น และแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญของพืชและสัตว์จะอยู่ในรูปแอมโมเนีย แต่ถ้ามีปริมาณแอมโมเนียตกค้างในสิ่งแวดล้อมมาก ๆ อาจส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์โดยตรง (1) และพืชจะใช้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนเตรทและแอมโมเนียโดยพบมากที่สุดในรูปแบบของปุ๋ยเคมีที่อยู่ในสารประกอบของเกลือแอมโมเนียม เช่น แคลเซียม แอมโมเนียมไนเตรท แอมโมเนียมฟอสเฟต (2) ในปัจจุบันพบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีในพื้นที่เกษตรกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อปุ๋ยที่ตกค้างถูกชะลงแหล่งน้ำจะทำให้มีปริมาณไนโตรเจนสูงและทำให้เกิดกระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) สูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ โดยทั่วไปในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียจะใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรี ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาเบเธรลอต (Betherlot Reaction) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์เกิดเป็นสารประกอบคลอโรเอมีน ซึ่งเกิดการควบแน่นต่อกับฟีนอลได้สารประกอบควิโนน

คลอโรเอมีน แล้วควบแน่นต่อกับฟีนอลเลตไอออน เกิดเป็นสารประกอบอินโดฟีนอลบลู (Indophenol Blue) (3–5) ส่วนปฏิกิริยาของเนสเลอร์ (Nessler's reaction) ใช้ปรอทคลอไรด์ และโพแทสเซียมไอโอไดด์ในภาวะที่เป็นเบส เกิดเป็นสารประกอบโพแทสเซียมเตตระไอโอโดเมอคูเรต (II) เมื่อสารนี้ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียจะเกิดตะกอนสีเหลืองส้ม (6) ซึ่งทั้งสองวิธีมีสภาพไววิเคราะห์และความจำเพาะเจาะจงสูง แต่วิธีดังกล่าวมีหลายขั้นตอนที่ซับซ้อน และใช้รีเอเจนต์ที่มีความอันตราย จากที่ดังกล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำเสนอทางเลือกอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์แอมโมเนียโดยใช้อินดิเคเตอร์กรด-เบส ร่วมกับการแพร่ของแก๊ส โดยอาศัยการเปลี่ยนจากแอมโมเนียมไอออนไปเป็นแก๊สแอมโมเนีย แก๊สแอมโมเนียจะแพร่ไปทำปฏิกิริยากับอินดิเคเตอร์ (7–10) งานวิจัยก่อนหน้านี้ประสบความสำเร็จในการแยกแก๊สแอมโมเนียที่แพร่บนกระดาษในการวิเคราะห์แอมโมเนียในตัวอย่างน้ำเสีย โดยใช้ฟิโอะอินดิเคเตอร์เป็นรีเอเจนต์ที่ใช้จับกับแก๊ส และใช้เครื่องสแกนเนอร์เป็นตัวตรวจวัด (8) อย่างไรก็ตามในการเตรียมตัวอย่างมีความจำเป็นก่อนการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมและตัวอย่างที่ซับซ้อนเนื่องจากมีเมทริกซ์ที่สามารถไปอุดตันรูของเมมเบรนและทำให้ลดสภาพไววิเคราะห์ได้ เคมีสีเขียวเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีหลักการที่เกี่ยวข้องกับการลดการเกิดของเสียจากการทดลอง การใช้ตัวทำละลายที่ปลอดภัยหรือรีเอเจนต์ที่มีความเป็นพิษน้อย (11, 12) โดยมีงานวิจัยได้รายงานเกี่ยวกับการใช้อินดิเคเตอร์ธรรมชาติสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีตามค่าความเป็นกรด-เบส เช่น สารสกัดจากดอกกล้วยไม้ (2, 13, 17) ดอกอัญชัน (13, 14) บิทรูท (13) ขมิ้นกับมะนาว (15) และกะหล่ำปลีแดง (16) เป็นต้น อินดิเคเตอร์หรือรีเอเจนต์ธรรมชาติสามารถนำมาใช้บนกระดาษกรอง ซึ่งทำให้เป็นวิธีที่ราคาไม่แพงในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนีย (18, 19)

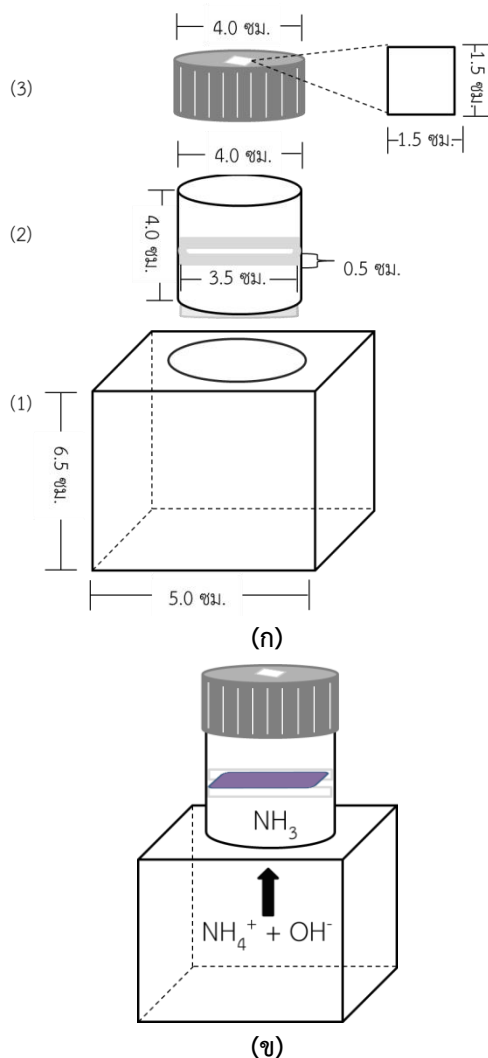
งานวิจัยนี้ได้มีการสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย โดยได้ศึกษาสารสกัดจากพืช

ธรรมชาติ 3 ชนิด (กะหล่ำปลีแดง ดอกกล้วยไม้ และดอกอัญชัน) ที่นำสารสกัดมาตรึงบนกระดาษ เนื่องจากในพืชทั้ง 3 ชนิดมีรงควัตถุที่สำคัญ ซึ่งจัดอยู่กลุ่มสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และอยู่รูปสารไซยาไดนิน (Cyanidin) ที่เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สแอมโมเนียแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสีบนกระดาษจากสีม่วงเป็นน้ำเงินอมเขียว จากนั้นจะตรวจวัดค่าความเข้มแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน (RGB) ด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ภายใต้กล้องควมคุมแสง และภายใต้ภาวะที่เหมาะสมจะได้นำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แอมโมเนียในตัวอย่างปุ๋ยเคมีและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับวิธีมาตรฐาน

วิธีดำเนินการวิจัย

การสร้างอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายสำหรับการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่ทำจากอะคริลิกใสและฝาปิดพลาสติก (รูปที่ 1 (ก)) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือส่วนที่ 1 เป็นห้องสำหรับทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียม คลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดเป็นแก๊สแอมโมเนียซึ่งออกแบบให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5×6.5 เซนติเมตร ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่ออกแบบสำหรับตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียที่เกิดขึ้นประกอบด้วยอะคริลิกใสทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร และตรงกลางของทรงกระบอกออกแบบสำหรับวางกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากพืชธรรมชาติประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกใสสองชิ้น ขนาด 0.5×3.5 เซนติเมตร วางห่างกัน 1.5 เซนติเมตร โดยส่วนที่ 1 และ 2 สามารถถอดออกได้และส่วนที่ 3 ฝาปิดที่มีช่องว่างสำหรับตรวจวัดค่าสีด้วยมือถือขนาด 1.5×1.5 เซนติเมตร โดยทำการวัดค่าสีในกล้องควมคุมแสง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 อุปกรณ์การตรวจวัดแอมโมเนีย (ก) ส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในแต่ละส่วน และ (ข) รูปร่างอุปกรณ์ที่สำเร็จ

การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

ชั่งแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl , 99.5%, Lab grade, KEMAUS) 2.6725 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) (รุ่น Arioso power I, บริษัท global hidden champions human corporation สาธารณรัฐเกาหลี) ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร

2. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 99%, AR grade, RCI Labscan) 1.0000 กรัม ละลายด้วยน้ำ DI ปริมาตรรวม 250 มิลลิลิตร

3. การเตรียมสารสกัดจากพืชธรรมชาติ 3 ชนิด นำกะหล่ำปลีแดงที่ล้างและหั่นละเอียดมาชั่งปริมาณ 100.00 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ นำไปบดในโกร่งให้ละเอียด จากนั้นเทใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำ DI 70 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ดังกล่าว ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อสกัดสารไซยาตินิน (Cyanidin) ออกมา นำไปกรองแบบหยาบด้วยผ้าขาวบาง ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำ DI นำสารสกัดที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman No. 1) เก็บสารสกัดที่กรองได้ในขวดสีชา ทำการเจือจางสารสกัดให้ได้ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ก่อนนำไปทำการวิเคราะห์สำหรับการเตรียมสารสกัดจากดอกกล้วยไม้ และดอกอัญชันมีขั้นตอนการเตรียมเช่นเดียวกับการสกัดสารจากกะหล่ำปลีแดงดังกล่าวข้างต้น

4. การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยเคมี

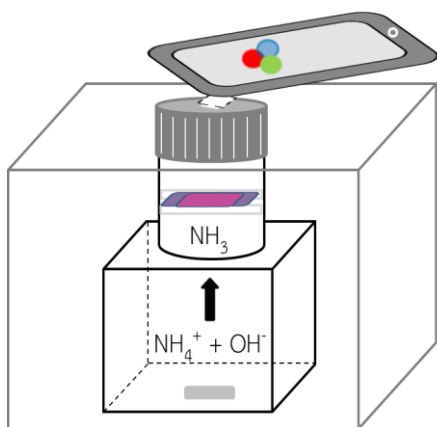
นำตัวอย่างปุ๋ยที่เตรียมไว้ ชั่ง 0.100x g แล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำ DI 20 มิลลิลิตร เขย่าจนปุ๋ยละลายหมด และปรับปริมาตรสุดท้ายให้ครบขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำ DI

การตรึงสารสกัดจากพืชธรรมชาติบนกระดาษ

เทสารสกัดจากพืชธรรมชาติปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นนำกระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman No. 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร วางลงในภาชนะที่มีสารสกัดแช่กระดาษกรอง 5 นาที เมื่อครบเวลานำกระดาษกรองมาเป่าให้แห้งด้วยไดร์เป่าผม จากนั้นตัดเป็นชิ้นขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

การวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดง

ปิเปต 0.1 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 1 (ก) ตำแหน่ง ส่วนที่ 1 จากนั้นเติมสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไป ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และปรับปริมาตรสุดท้ายให้ครบ 20 มิลลิลิตรด้วยน้ำ DI นำกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดง วางบนอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 1 (ข) ในส่วนที่ 2 ทำการกวนสารละลายผสม ด้วยเครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 3 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการตรวจวัดค่าความเข้มแสงของแสงสีแดง (R), สีเขียว (G), และสีน้ำเงิน (B) ในกล่องควบคุมแสงด้วยแอปพลิเคชัน RGB Color Detector บนโทรศัพท์มือถือ ดังรูปที่ 2 โดยนำค่าความเข้มแสงของแต่ละสีนำไปหาค่าของสัญญาณแปลงค่า (กระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากพืชธรรมชาติที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ DI) นำค่าความเข้มแสงของสีต่าง ๆ ไปแปลผลสัญญาณต่อไป

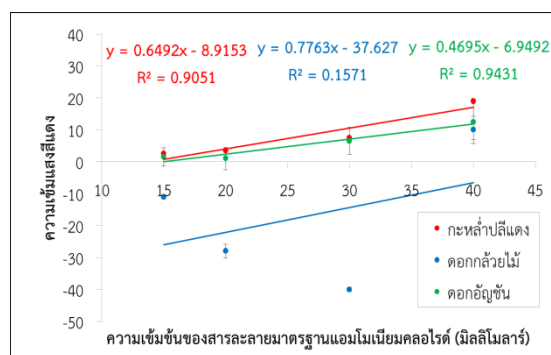


รูปที่ 2 การวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงด้วยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษาสารสกัดจากพืชธรรมชาติที่เหมาะสมต่อการตรึงบนกระดาษ

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า สารโซเดียมไนตริกซึ่งเป็นสารในกลุ่มแอนโทไซยานินที่พบมากในพืชที่มีรงควัตถุสีแดง และสีน้ำเงิน ซึ่งสารดังกล่าวสามารถละลายน้ำได้ดี และมีการเปลี่ยนแปลงสีตามค่าพีเอช (pH) ในภาวะที่เป็นกรด กลาง และเบส จะมีสีของสารละลายเป็นสีแดงชมพู สีม่วงและสีน้ำเงินอมเขียวหรือสีเหลือง ตามลำดับ (20) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจในการศึกษาสารสกัดจากพืชธรรมชาติประกอบด้วยสารสกัดจาก กะหล่ำปลีแดง ดอกกล้วยไม้ และดอกอัญชัน ซึ่งเป็นพืชที่มีสารกลุ่มแอนโทไซยานิน เพื่อตรึงสารสกัดดังกล่าวบนกระดาษ และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนีย จากการศึกษาเกี่ยวกับการหาสารสกัดจากพืชธรรมชาติ 3 ชนิด (กะหล่ำปลีแดง ดอกกล้วยไม้ และดอกอัญชัน) ที่เหมาะสมในการตรึงสารสกัดดังกล่าวบนกระดาษดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า เนื่องจากสีที่เกิดจากปฏิกิริยาบนกระดาษมีสีน้ำเงินอมเขียวจะดูคล้ำขึ้นแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดง (R) จึงติดตามสัญญาณของแสงสีนี้ จากการตรวจวัดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงให้ค่าสภาพไววิเคราะห์ (Sensitivity) สูงที่สุด และมีค่า R2 มากกว่า 0.9 เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดจากพืชธรรมชาติชนิดอื่น

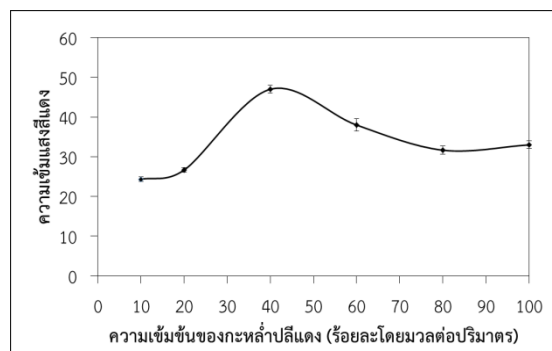


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์กับค่าความเข้มแสงสีแดง สำหรับกระดาษที่ตรึงสารสกัดจากดอกกล้วยไม้ กะหล่ำปลีแดง และดอกอัญชัน

การหาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

1. ผลการศึกษาความเข้มข้นของกะหล่ำปลีแดง สำหรับตรึงบนกระดาษ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกะหล่ำปลีแดงสำหรับตรึงบนกระดาษในช่วง 10.00–100.00 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร สารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงที่ตรึงบนกระดาษจะอยู่ในรูปแอนไฮดราเบส แอนไฮดรอน (Anhydrabase Anion) ซึ่งกระดาษจะเป็นสีม่วง (21) และหลังจากทำปฏิกิริยากับแก๊สแอมโมเนียที่มีฤทธิ์เป็นเบสจะทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอมเขียวที่อยู่ในรูปควินอยด์บลู (Quinoidal Blue) (22) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดกะหล่ำปลีแดงเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้น และแสดงค่าสูงสุดที่ 40 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นค่าความเข้มแสงจะลดลงและคงที่ (รูปที่ 4) เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดกะหล่ำปลีแดงเพิ่มขึ้นจะทำให้บดบังสีที่แท้จริงจากการทำปฏิกิริยา และทำให้ค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของกะหล่ำปลีแดงสำหรับตรึงบนกระดาษที่ 40 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

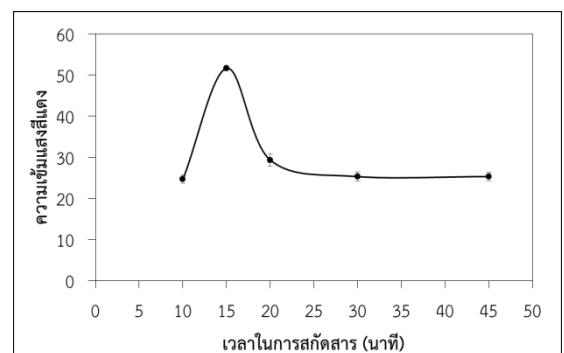


รูปที่ 4 ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงกับค่าความเข้มแสงสีแดง

2. ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสกัดกะหล่ำปลีแดงสำหรับตรึงบนกระดาษ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสกัดสารไซยานิน

(Cyanidin) ซึ่งสารดังกล่าวจะอยู่ในสารกลุ่มแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี อีกทั้งน้ำยังเป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาค้นคว้าเวลาที่ใช้ในการสกัดกะหล่ำปลีแดงสำหรับตรึงบนกระดาษในช่วง 10–45 นาที เมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดกะหล่ำปลีแดง กับค่าความเข้มแสงของแสงสีแดง (R) ดังรูปที่ 5 พบว่า เวลาในการสกัดสารเพิ่มขึ้นค่าความเข้มแสงสีแดงจะเพิ่มขึ้น และแสดงค่าสูงสุดที่เวลา 15 นาที จากนั้นค่าความเข้มแสงจะลดลงและคงที่จนถึงเวลา 45 นาที เนื่องจากที่เวลามากกว่า 15 นาที อาจเกิดการสลายตัวของสารสกัดกะหล่ำปลีแดง (23) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาในการสกัดสารที่ 15 นาที สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

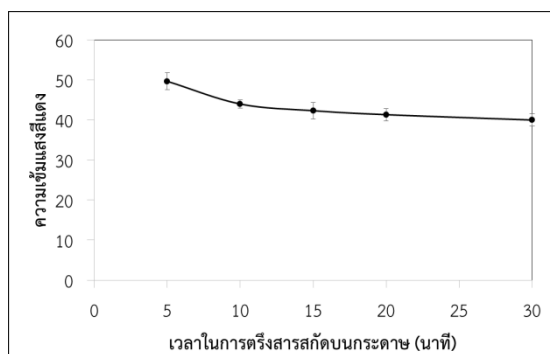


รูปที่ 5 ผลของการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสกัดกะหล่ำปลีแดงกับค่าความเข้มแสงสีแดง

3. ผลการศึกษาเวลาในการตรึงสารสกัดบนกระดาษ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเวลาในการตรึงสารสกัดกะหล่ำปลีแดงบนกระดาษในช่วง 5–30 นาที จากรูปที่ 6 พบว่า ที่ 5 นาที แสดงค่าความเข้มแสงสูงสุด เมื่อเวลามากกว่า 5 นาที ค่าความเข้มแสงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นรีเอเจนต์ธรรมชาติซึ่งอาจจะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วยอากาศ ดังนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอาจเกิดการสลายตัวของสารสำคัญที่อยู่ในรีเอเจนต์ และเมื่อนำกระดาษที่ตรึงด้วยรีเอเจนต์ดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับ

แอมโมเนียจึงส่งผลให้ความเข้มข้นที่วัดได้ลดลง (23) งานวิจัยนี้ได้เริ่มศึกษาเวลาสำหรับการตรึงสารสกัดบนกระดาษกรองที่ 5 นาที จากการสังเกตที่เวลาน้อยกว่า 5 นาที ปริมาณของสารสกัดที่ตรึงบนกระดาษกรองยังดูดซับไม่ทั่วพื้นที่ผิวของกระดาษซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแม่นยำ อีกทั้งเวลาในการตรึงสารสกัดที่ 5 นาที ถือว่าเป็นเวลาที่ไม่นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาในการตรึงสารสกัดบนกระดาษที่ 5 นาที สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

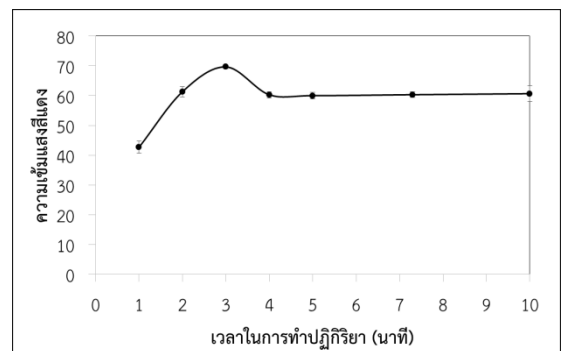


รูปที่ 6 ผลของการศึกษาเวลาที่ใช้ในการตรึงสารสกัดบนกระดาษกรองกับค่าความเข้มข้นแอมโมเนีย

4. ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สแอมโมเนียกับกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดกะหล่ำปลีแดง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สแอมโมเนียกับกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดกะหล่ำปลีแดงในช่วง 1-10 นาที จากรูปที่ 7

เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นแอมโมเนีย พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลา 3 นาที หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นลดลงที่ 4 นาที และค่าความเข้มข้นคงที่หลังจากเวลา 4 นาทีเป็นต้นไป เพราะปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียที่เป็นเบสกับบรีเอเจนต์ธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่ 3 นาทีในการทำปฏิกิริยา และสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

จากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ สามารถสรุปภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดง และตรวจวัดด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 7 ผลของการศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นแอมโมเนีย

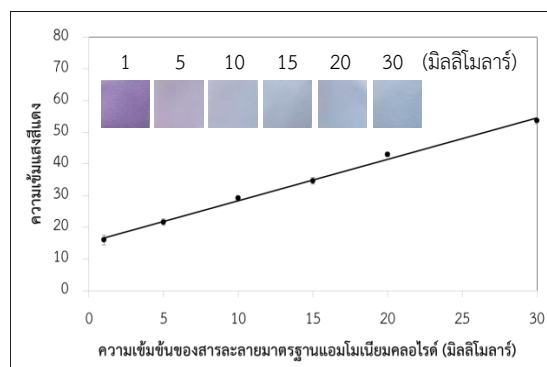
ตารางที่ 1 ภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดง และตรวจวัดค่าสีด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่

ตัวแปรที่ศึกษา	ช่วงที่ศึกษา	ค่าที่เหมาะสม
ความเข้มข้นของกะหล่ำปลีแดง	10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร	40 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร
เวลาที่ใช้ในการสกัดสารกะหล่ำปลีแดง	10, 15, 20, 30 และ 45 นาที	15 นาที
เวลาในการตรึงสารสกัดบนกระดาษกรอง	5, 10, 15, 20 และ 30 นาที	5 นาที
เวลาในการทำปฏิกิริยา	1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 นาที	3 นาที

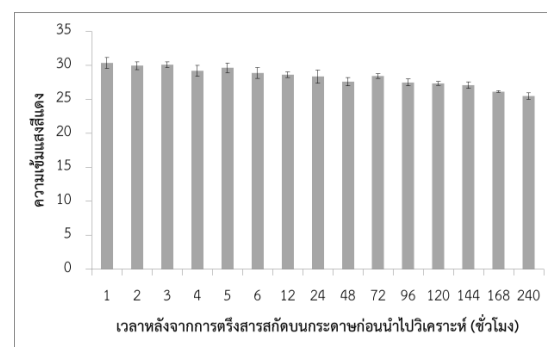
ค่าคุณลักษณะทางการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดง และตรวจวัดค่าสีด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์สามารถนำมาหาค่าคุณลักษณะทางการวิเคราะห์ได้ โดยการทดลองพบว่า ช่วงการใช้งานที่เป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์อยู่ในช่วงความเข้มข้น 1.00–30.00 มิลลิโมลาร์ ได้สมการเส้นตรง $y = 1.31 \pm 0.03x + 15.34 \pm 0.59$, $R^2 = 0.9955$ แสดงดังรูปที่ 8 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) หาได้จากสามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็ก (3SD_{blank}, n = 10) และค่าขีดจำกัดในการวิเคราะห์ปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) หาได้จากสิบเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณแบล็ก (10SD_{blank}, n = 10) มีค่าเท่ากับ 0.24 และ 0.81 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และจากการศึกษาหาความแม่นยำในการวิเคราะห์ของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์ 5.00, 15.00 และ 30.00 มิลลิโมลาร์ โดยการวัดสัญญาณค่าความเข้มแสงสีแดงจำนวน 9 ครั้ง พบว่า ค่า %RSD เท่ากับ 4.6, 2.9 และ 1.9 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า %RSD น้อยกว่า 5 % แสดงว่าวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูง นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้หาค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) ศึกษาโดยการเติมสารมาตรฐานแอมโมเนียม คลอไรด์ความเข้มข้น 5.00 และ 10.00 มิลลิโมลาร์ ในตัวอย่าง และทำการเทียบค่าสัญญาณที่ได้ข้างต้นกับสารมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5.00 และ 10.00 มิลลิโมลาร์ ตามสูตรการคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับ พบว่าอยู่ในช่วง 96.8–107.0 % และจากการศึกษาค่าคงตัว (Stability) ของกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงดังรูปที่ 9 เมื่อนำกระดาษที่ผลิตและเก็บในที่แห้งและเย็นเป็นเวลาในช่วง 1–240 ชั่วโมงก่อนนำไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมคลอไรด์ พบว่า ค่าความเข้มแสงสีแดงมีค่า

ลดลงประมาณ 16 % ดังนั้น ควรนำกระดาษที่ตรึงด้วยกะหล่ำปลีแดงไปใช้ภายใน 1 สัปดาห์เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวของรงควัตถุที่อยู่ในสารสกัดกะหล่ำปลีแดง ถ้าเก็บกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดในที่มืดและอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บรักษาได้นาน 30 วัน (24)



รูปที่ 8 ช่วงความเป็นเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมคลอไรด์กับค่าความเข้มแสงสีแดง



รูปที่ 9 ความคงตัว (Stability) ของกระดาษที่ตรึงด้วยสารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงที่เก็บรักษาในช่วงเวลาต่าง ๆ (ชั่วโมง) ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้น

การประยุกต์ใช้วิธีที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างปุ๋ยเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียใน

ตัวอย่างปุ๋ยเคมีที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด ผลการวิเคราะห์รายงานเป็นร้อยละไนโตรเจน (% Nitrogen, ร้อยละโดยมวล) เมื่อเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน (ตารางที่ 2) พบว่า ทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบวิธีทางสถิติแบบที่

(t-test) (Paired two sample for means) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า t_{stat} มีค่าเท่ากับ 0.17 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $t_{critical}$ ที่มีค่าเท่ากับ 4.30 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 ปริมาณร้อยละโดยมวลไนโตรเจน (% Nitrogen) ในตัวอย่างปุ๋ยเคมีของวิธีที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐาน

ตัวอย่างที่	% Nitrogen (ร้อยละโดยมวล)	
	วิธีที่พัฒนาขึ้น	วิธีมาตรฐาน
S1	16.21±2.36	19.89±1.57
S2	16.38±1.19	18.83±1.48
S3	19.51±1.17	18.19±1.57
S4	27.64±1.23	25.85±1.54

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียบนกระดาษที่ตรึงด้วยกระดาษสี RGB ด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ อุปกรณ์ที่พัฒนาประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณแอมโมเนียในตัวอย่างปุ๋ยเคมี โดยกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ที่ง่าย สะดวก ราคาไม่แพง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปวิเคราะห์นอกสถานที่ได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยตามโครงการสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณกองทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อการพัฒนา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ตามเลขที่สัญญา B26301016 เรื่อง การสร้างชุดทดสอบอย่างง่ายโดยใช้เรอเจนต์ธรรมชาติสำหรับหาปริมาณแอมโมเนียในปุ๋ยเคมี และขอขอบคุณนางสาวปราณี ไชยวุฒิ นางสาวสิริขวัญ มุณีจาร์วัฒนกุล และนายจตุพล บุญภา ผู้ช่วยวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Yuen KI, Shit FC. Ammonia production, excretion, toxicity, and defense in fish: a review. *Frontiers in Physiology*. 2010;1:1–20.
2. Sukaram T, Sirisakwisut P, Sirirak J, Nacapricha D, Chaneam S. Environmentally friendly method for determination of ammonia nitrogen in fertilisers and wastewaters based on flow injection-spectrophotometric detection using natural reagent from orchid flower. *Int J Anal Chem*. 2018;98(10):907–20.
3. Daridon A, Sequeira M, Pennarun-Thomas G, Dirac H, Krog JP, Gravesen P, et al. Chemical sensing using an integrated microfluidic system based on the Berthelot reaction. *Sensor Actuat B-Chem*. 2001;76(1–3):235–43.
4. Felix EP, Cardoso AA. Colorimetric determination of ammonia in air using a

- hanging drop. Instrum Sci Technol. 2003;31(3):283–94.
5. Lin K, Li P, Wu Q, Feng S, Ma J, Yuan D. Automated determination of ammonium in natural waters with reverse flow injection analysis based on the indophenol blue method with o-phenylphenol. Microchem J. 2018;138:519–25.
 6. Demutskaya L, Kalinichenko I. Photo-metric determination of ammonium nitrogen with the nessler reagent in drinking water after its chlorination. J Water Chem Technol. 2010;32(2):90–4.
 7. Oms M, Cerda A, Cladera A, Cerdà V, Forteza R. Gas diffusion techniques coupled sequential injection analysis for selective determination of ammonium. Anal Chim Acta. 1996;318(3):251–60.
 8. Segundo RA, Mesquita RBR, Ferreira MTSOB, Teixeira CFPC, Bordalo AA, Rangel AOSS. Development of a sequential injection gas diffusion system for the determination of ammonium in transitional and coastal waters. Anal Methods-UK. 2011;3(9):2049–55.
 9. Jayawardane BM, McKelvie ID, Kolev SD. Development of a gas-diffusion microfluidic paper-based analytical device (μ PAD) for the determination of ammonia in wastewater samples. Anal Chem. 2015;87(9): 4621–6.
 10. Musile G, Gottardo R, Palacio C, Shestakova K, Raniero D, Elio F, et al. Development of a low cost gas diffusion device for ammonia detection in the vitreous humor and its preliminary application for estimation of the time since death. Forensic Sci Int. 2019;295:150–6.
 11. de la Guardia M, Garrigues S. Handbook of Green Analytical Chemistry. 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd; 2012.
 12. Armenta S, Garrigues S, de la Guardia M. The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. Trac-Trend Anal Chem. 2015;71:2–8.
 13. Grudpan K, Hartwell SK, Wongwilai W, Grudpan S, Lapanantnoppakhun S. Exploiting green analytical procedures for acidity and iron assays employing flow analysis with simple natural reagent extracts. Talanta. 2011;84(5):1396–400.
 14. MY MUL, Atika A, OA MZ, Khor P. A comparative analysis of Clitoriaternatea Linn. (ButterflyPea) flower extract as natural liquid pH indicator and natural pH paper. Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences. 2018;17(1):97–103.
 15. Supharoek SA, Ponhong K, Siriangkhawut W, Grudpan K. Employing natural reagents from turmeric and lime for acetic acid determination in vinegar sample. J Food Drug Anal. 2018; 26(2):583–90.
 16. นภาพร วรรณพรม, เยาวลักษณ์ ชื่นหัวโทน. การวิเคราะห์หาปริมาณกรดอะซิติกในตัวอย่างน้ำส้มสายชูด้วยเทคนิคแลกเปลี่ยนไอออนโครมาโทกราฟีโดยใช้สารสกัดจากกะหล่ำปลีแดงเป็นรีเอเจนต์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการระดับชาติ นเรศวรวิจัยครั้งที่ 14: University in Disruptive Era; 1–2 พ.ย. 2561;

- มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก. กองส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2561. น. 165–73.
17. เยาวลักษณ์ ชันหวัทอน, นภาพร วรรณพรม. การวิเคราะห์หาปริมาณกรดซิตริกในน้ำมะนาวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากธรรมชาติจาก กลีบดอกกล้วยไม้ (*Dendrobium sonia earsakul*) เป็นรีเอเจนต์ร่วมกับการตรวจวัดด้วยเครื่อง PiCO-EXPLORER. การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3; 18–19 ม.ค. 2562; คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.พระนครศรีอยุธยา. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ; 2562. น. 498–507.
 18. Peters JJ, Almeida MIGS, Šraj LOC, McKelvie ID, Kolev SD. Development of a micro-distillation microfluidic paper based analytical device as a screening tool for total ammonia monitoring in freshwaters. Anal Chim Acta. 2019;1079:120–8.
 19. Phansi P, Sumantakul S, Wongpakdee T, Fukana N, Ratanawimarnwong N, Sitanurak J, et al. Membraneless gas-separation microfluidic paper-based analytical devices for direct quantitation of volatile and non volatile compounds. Anal Chem. 2016;88(17):8749–56.
 20. รัตนา วงศ์ชูพันธ์, ขวัญกมล ชูนิ่ม, เฉลิมพร ทองพูน, ณัฐพันธ์ สงวนศักดิ์บาร์มี. พืชมีสีกับการเป็นอินดิเคเตอร์ธรรมชาติ. Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences. 2559;17:74–83.
 21. Brouillard R, Dubois JE. Mechanism of the structural transformations of antho-cyanins in acidic media. Journal of American the Journal Society. 1977;9:1359–64.
 22. Castaneda-Ovando A, deLourdes Pacheco-Hernández M, Páez-Hernández ME, Rodríguez JA, Galán-Vidal CA. Chemical studies of anthocyanins: a review. Food Chem. 2009;113(4):859–71.
 23. Weinges K, Nader FW. Proanthocyanidins. In: Pericles Markakis, editor. Anthocyanins as food colors. 1st ed. Newyork: Academic Press A subsidiary of Harcourt Brace Javanovich; 1982. p. 111.
 24. Xiu-li HE, Xue-li LI, Yuan-ping LV, Qiang HE. Composition and color stability of anthocyanin-based extract from purple sweet potato. Food Sci Tech-Brazil. 2015;35(3):468–73.



Simulation of Shielding Parameters of Some High Entropy Alloys Containing Energies for Gamma Ray and Fast Neutron

Kittisak Sriwongsa^{1,2*}, Punsak Glumglomchit³, Teeratus Wananuraksakul³, Arisa Pimprakhon³, Taweewat Hanchana³ and Sunantasak Ravangvong⁴

¹Lecturers responsible for Bachelor of Education Program in Physics, Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, THAILAND

²The demonstration school of Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, THAILAND Thailand

³Huahin Vitthayalai School, Hua-Hin, Prachuap Khiri Khan, 77110, THAILAND

⁴Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi, 76000, THAILAND

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	This work explains the theoretically radiation shielding of alloy
Received: 24 April, 2020	materials by using WinXCom software program at energies ranging 1
Revised: 29 May, 2020	keV-100 GeV and the density of alloy was computed by rule of mixture
Accepted: 19 June, 2020	(ROM). The radiation shielding properties of some high entropy alloys
Available online: 23 June, 2020	(HEAs) were found dependent on energies ranging. At low energies
DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.9	ranging, the mass attenuation coefficient presented many intermittent
Keywords: alloy, mass	shifts in accordance with the photoelectric effect absorption edges. At
attenuation coefficient,	intermediate energies ranging, the mass attenuation coefficient value is
fast neutron	nearly constant, and the effective atomic number was nearly the mean
	atomic number as the Compton scattering is main process. At high
	energies ranging, the pair production is main process and tends to be
	constant at high energies ranging. The effective atomic number and the
	electron density of alloy had the opposite tend. The mean free path
	and the half value layer had the same behavior. Among the selected
	alloys, the alloy only in composite Co-Cr-Fe-Ni was found to possess
	superior radiation shielding effectiveness due to its higher values of

both the mass attenuation coefficient and the effective atomic number and lower values of the electron density, the mean free path and the half value layer. In addition, the fast neutron removal cross-section was evaluated and discussed. It is found that the fast neutron removal cross-section values for the studied alloys in composite Co-Cr-Fe-Ni had highest value. The computation was useful for the potential application of alloys containing energies in the field of gamma-ray and neutron shielding medium.

INTRODUCTION

Since starting to study and design on high entropy alloys (HEAs), the indexed study output in Web of Science (WoS) indicates that high entropy alloys (HEAs) are an emerging layer of alloys that are lately being popularly studied (1-4). The alloy materials are found in many fields such as irradiation, nuclear reactors, engineering materials, petrochemical industries and biomedical implants (5-8). In the field of radiation physics and dosimetry, there are many important photon interaction parameters such as mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic number (Z_{eff}) and electron density (N_{el}) which helping in determine and design for radiation protection efficiency of medium (9,10).

Mass attenuation coefficient (μ_m) is common property of medium which studies the probability of interaction for gamma radiations with a medium. An effective atomic number (Z_{eff}) is property of mixture or compound like an atomic number of elements. So anyway, these values are feature based on energy, helps to display the efficacy for shielding of medium and interprets gamma radiations attenuation by a

medium. Electron density (N_{el}) value is another common property of the medium, which lets data about the average number of electrons per unit mass of medium. Moreover, the partial density method is popularly use to research the fast neutron removal cross-section of shielding medium (11-13).

In this context, mass attenuation coefficients, effective atomic number, effective electron density, mean free path, half-value layer and fast neutron removal cross-section for alloys have been computed. The computation will give useful data for the alloy that was used in shielding medium applications.

MATERIALS AND METHODS

Density, ρ_{mix} , of alloys is the basic parameter using determined the important parameters which determined by the rule of mixture (ROM) by Eq. (1) (14):

$$\rho_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i A_i}{\sum_{i=1}^n c_i A_i \rho_i} \quad (1)$$

here ρ_i , c_i , and A_i are density, atomic fraction and atomic weight of element i^{th} , respectively.

The theoretical/method basis have been separated into the following sub-sections:

Radiation shielding parameters

The theoretical simulation of mass attenuation coefficients (μ_m) of alloy using WinXCom software program for a photon at energies range 1 keV-100 GeV by Eq. (2) (15,16):

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu_m)_i \quad (2)$$

here w_i and $(\mu_m)_i$ means mass fraction and mass attenuation coefficient of element i , respectively.

Effective atomic numbers (Z_{eff}) for alloy can be determined from Eq. (3) (15,16):

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (3)$$

here $\sigma_{t,a}$ and $\sigma_{t,el}$ are total atomic and electronic cross-section, respectively and both values of cross-section are determined from Eq. (4) and (5) (15-17):

$$\sigma_{t,a} = \frac{\mu_m M}{N_A \sum_i n_i} \quad (4)$$

$$\sigma_{e,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i}{Z_i} A_i (\mu_m)_i \quad (5)$$

here M , n_i , N_A , f_i , Z_i and A_i are the molecular weight of mixture component in the alloy, oxygen atom number per each composition, Avogadro's number, respectively. μ_m and $(\mu_m)_i$ are mass attenuation coefficients and mass attenuation coefficient of element i , respectively.

Electron densities (N_{el}) for alloy refer to electrons number per unit mass were computed by formula Eq. (6) (16,17):

$$N_{el} = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,el}} \quad (6)$$

Mean free path, MFP, is the average distance between two successive interactions of photons in medium and computed by following in Eq. (7) (17, 18):

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

The half-value layer (HVL) is a quantity describing the thickness of attenuator that attenuation of photon density to half of the incident energy as the lower of HVL value is better shielding effectiveness and can be calculated using Eq. (8) (19, 20):

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (8)$$

here μ is linear attenuation coefficient which computed by multiplying of density and mass attenuation coefficient of a compound.

Fast neutron removal cross-section

The probability of the interaction for neutron with the medium can be discussed on macroscopic effective removal cross-section (Σ_R) and can be calculated by following in Eq. (9) (21-23):

$$\Sigma_R = \sum_i w_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i \quad (9)$$

here $(\Sigma_R/\rho)_i$ (cm^2/g) and w_i are mass removal cross-section of i^{th} constituent and partial density (g/cm^3), respectively.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Gamma rays shielding properties of alloys were discussed by calculation of mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic

numbers (Z_{eff}), effective electron density (N_{el}), mean free path (MFP), half-value layer (HVL) and fast neutron removal cross-section. The chemical compositions (wt%) of elements and density of aluminium (Al), cobalt (Co), chromium (Cr), iron (Fe), nickel (Ni) and titanium (Ti) alloys system are presented in Table 1.

Table1 The chemical compositions in wt. fraction and density (g/cm^3) of the alloy (1)

Sample	Wt. fraction of elements						Density (g/cm^3)
	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti	
A0	-	0.2551	0.2347	0.2551	0.2551	-	8.09
A1	0.0698	0.2326	0.2326	0.2326	0.2326	-	7.55
A2	0.1304	0.2174	0.2174	0.2174	0.2174	-	7.12
A3	0.1837	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	-	6.76
A4	0.1667	0.1852	0.1852	0.1852	0.1852	0.0926	6.48

Table 2 The photon energies (in $\times 10^{-3}$ MeV) of absorption edges for elements.

Element	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni
Atomic number (Z)	13	22	24	26	27	28
K	1.56	4.97	5.99	7.11	7.71	8.33
L1						1.01

Mass attenuation coefficient (μ_m)

Figure 1 presents the relationship between μ_m of alloys and energy. As figure 1, μ_m decreased rapidly at 0.001-0.1 MeV which photoelectric effect is the main interaction process, and slowly at 0.1-10 MeV which Compton scattering process is dominated, whereas start increases slowly at 10-10⁵MeV as

pair production is the main interaction process.

The discontinuities in μ_m values were appeared in low energy range because of L and K absorption edges of elements as presented in table 2. From Figure 1, the sample A0 has the highest μ_m . All in all, it indicated that A0 is the best material for shielding radiation.

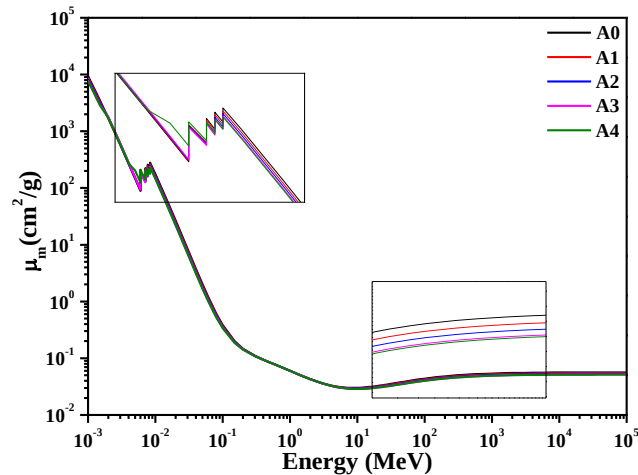


Figure 1 The μ_m of alloys with energy.

Effective atomic number (Z_{eff}) and electron density (N_{el})

Figure 2 presents the Z_{eff} of alloys at energies 10^{-3} - 10^5 MeV. In the limited energies range at 0.1 MeV-1.0 MeV, the Z_{eff} value of alloys decreased rapidly with increasing energy. During 1.0-150.0 MeV, the Z_{eff} value increased with increasing energy. The energies above 150 MeV, Z_{eff} value nearly constant was observed for all alloys. Z_{eff} value of alloy must stay in between the lowest atomic number ($Z = 13$) and highest atomic numbers ($Z = 28$) of ingredient elements (11). Among alloys, Z_{eff} maximum value was observed of A0 alloy in total energies range (having maximum content of Ni); whereas Z_{eff} minimum value was observed of A4 (having minimum content of Ni). Figure 3 presents the N_{el} of alloys with energy. It will be noted that the trend of N_{el} according to different energies is the same trend Z_{eff} value of alloy. So anyway, there are swing back in the trend i.e. A4 alloy shown N_{el} highest value whereas it had Z_{eff} lowest value. Similarly, A0 alloy had N_{el} lowest value whereas

it shows the highest Z_{eff} value. The highest N_{el} value for A4 alloy can be attributed to the Ti content's alloy effect. The vacant sites in the structure of alloy were replaced by Ti atom which result in increased electron density of selected alloy medium.

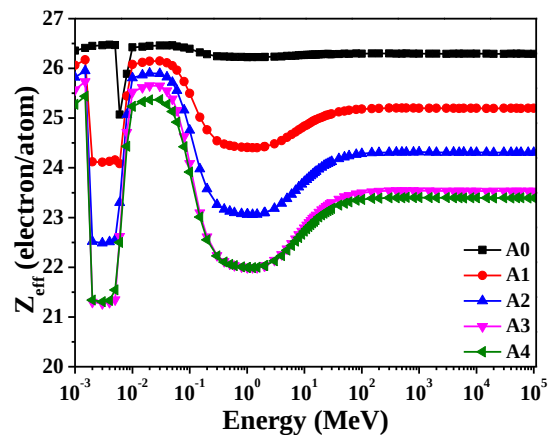


Figure 2 The Z_{eff} of alloys with energy.

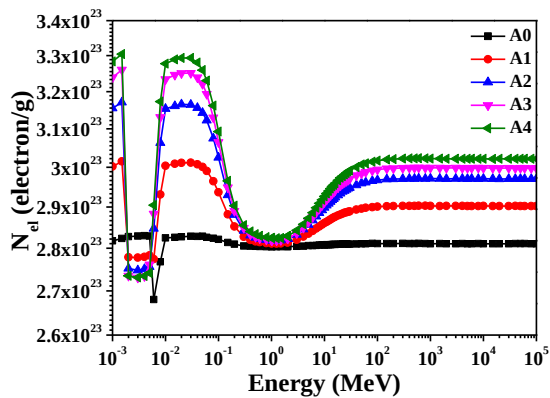


Figure 3 The N_{el} of alloys with energy.

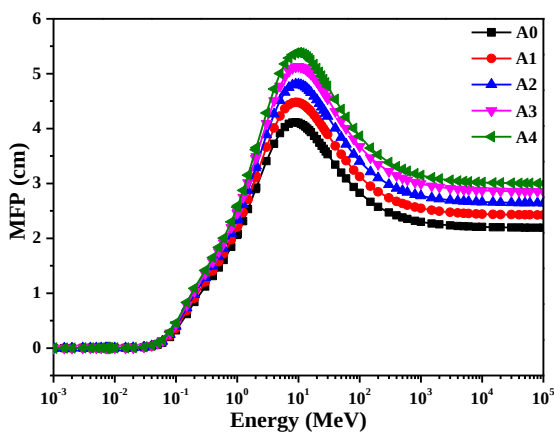


Figure 4 The MFP of alloys with energy.

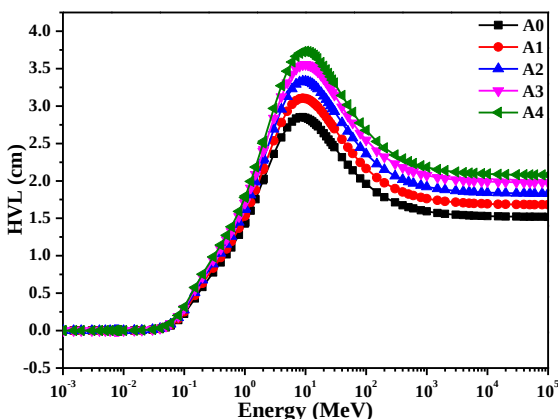


Figure 5 The HVL of alloys with energy.

Figures 4 and 5 show the MFP and HVL of the energy range at 1 keV-100 GeV. MFP and HVL values of alloys were increased with increasing photon energy. MFP and HVL value

were seen very small from 1-100 keV and rise gradually with increasing energies until 8 MeV. After that, a slow rate of increase in MFP and HVL values with energies were registered at an energy ranging from 8 MeV-10 MeV. For energies > 10 MeV, MFP and HVL value shown exponential decreased with additional energies and becomes nearly constant at energies above 1000 MeV. This variation is acceptable in the light of reliance on cross-section value for different major photon interaction processes at different energies range.

The lower energies range, cross-section of the photoelectric absorption effect process was presented in inversely with energy as $E^{-3.5}$. It means, photon interaction probability at lower energy, photoelectric absorption effect will higher values and smaller thickness looks enough for absorption photons in investigated medium, on the other hand, increment in the thickness of interacting medium was required for photon interaction. Because of this high reliance on cross-section value on energy, MFP and HVL values swell gradually for chosen alloys. At intermediate energies range, the cross-section of the Compton scattering process is presented in linear relation with energies. Due to this weak dependence of cross-section value on energies, tends of MFP and HVL values increase with slow rates for chosen alloys. The cross-section of pair production process founds logarithmic with high energies range. So, with expansion at high energies, photon interaction of pair production probability tends to occur exponentially. Therefore, the thickness requirement may

decrease with a large amount of photon energies for better absorption in the medium.

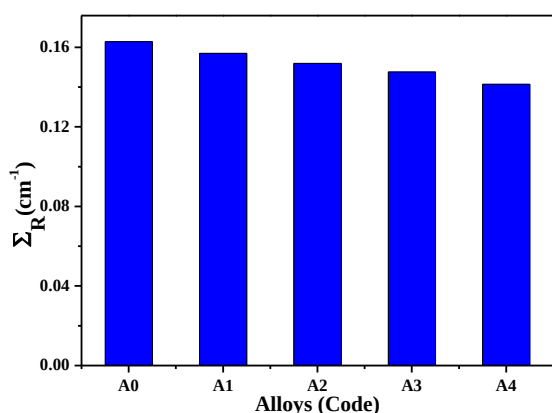


Figure 6 The Σ_R for alloys.

Fast neutron removal cross-section

The fast neutron removal cross-section Σ_R (cm⁻¹) value of alloys were exhibited in Figure 6. It found that Σ_R (cm⁻¹) of A0 was highest. Therefore, A0 alloy is the best neutron shielding compared with other alloys.

CONCLUSION

In summary, the value of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, effective electron densities, mean free path and half-value layer for alloys were determined by WinXCom software at energy range 1 keV–100 GeV. The result has shown that Z_{eff} and N_{el} values depend on the energies. The graph of interactions at low photon energy has peaks (absorption edges) because of the dominant photoelectric effect near L and K absorption edges of alloy composition. A0 alloy was found to have the lowest mean free path and half-value layer value. The results from this study indicated that A0 alloy is the best medium for gamma rays

shielding applications. Also, the result of fast neutron removal cross-section value indicated that A0 is an excellent medium too.

ACKNOWLEDGEMENT

In this study, the authors would like to thank Phetchaburi Rajabhat University for its support instrument.

REFERENCES

1. Qiu Y, Thomas S, Fabijanic D, Barlow AJ, Fraser HL, Birbilis N. Microstructural evolution, electrochemical and corrosion properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNiTi}_y$ high entropy alloys. *Mater Design*. 2019;170:107698.
2. Alijani F, Reihanian M, Gheisari Kh. Study on phase formation in magnetic FeCoNiMnV high entropy alloy produced by mechanical alloying. *J Alloy Compd*. 2019;773:623-30.
3. Chen LB, Wei R, Tang K, Zhang J, Jiang F, Sun J. Ductile-brittle transition of carbon alloyed $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ high entropy alloys. *Mater Lett*. 2019;236:416-19.
4. Jiang H, Jiang L, Qiao D, Lu Y, Wang T, Cao Z, et al. Effect of Niobium on Microstructure and Properties of the $\text{CoCrFeNb}_x\text{Ni}$ High Entropy Alloys. *J Mater Sci Technol*. 2017;33:712-7.
5. Vishwanadh B, Vaibhav K, Jha SK, Mirji KV, Samajdar I, Srivastava D, et al. Development of Nb-1%Zr-0.1%C alloy as structural components for high temperature reactors. *J Nucl Mater*. 2012;427:350-8.

6. Li X, Cheng Z, Hu K, Chen H, Yang C. Crystallization kinetics and spark plasma sintering of amorphous $\text{Ni}_{53}\text{Nb}_{20}\text{Ti}_{10}\text{Zr}_8\text{Co}_6\text{Ta}_3$ powders prepared by mechanical alloying. *Vacuum*. 2015;114:93-100.
7. Vishwanath PS, Badiger NM. Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Ann Nucl Energy*. 2014;64:301-10.
8. Jin W, Wu G, Li P, Paul KC. Improved corrosion resistance of Mg-Y-RE alloy coated with niobium nitride. *Thin Solid Films*. 2014;572:85-90.
9. Ruengsri S, Insiripong S, Sangwaranatee N, Kaewkhao J. Development of barium borosilicate glasses for radiation shielding materials using rice husk ash as a silica source. *Prog Nucl Energy*. 2015;83:99-104.
10. Mostafa AMA, Issa SAM, Sayyed MI. Gamma ray shielding properties of $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ doped with WO_3 . *J Alloy Compd*. 2017;708:294-300.
11. Singh H, Sharma J, Singh T. Extensive investigations of photon interaction properties for $\text{Zn}_x\text{Te}_{100-x}$ alloys. *Nucl Eng Technol*. 2018;50:1364-71.
12. Kaur S, Singh KJ. Investigation of lead borate glasses doped with aluminium oxide as gamma ray shielding materials. *Ann Nucl Energy*. 2014;63:350-54.
13. Dong MG, Xue XX, Elmahroug Y, Sayyed MI, Zaid MHM. Investigation of shielding parameters of some boron containing resources for gamma ray and fast neutron. *Results Phys*. 2019;13:102-29.
14. Xiang C, Han EH, Zhang ZM, Fu HM, Wang JQ, Zhang HF, et al. Design of single-phase high-entropy alloys composed of low thermal neutron absorption cross-section elements for nuclear power plant application. *Intermetallics*. 2019;104:143-53.
15. Limkitjaroenporn P, Kaewkhao J, Chewpraditkul W, Limsuwan P. Mass Attenuation Coefficient and Effective Atomic Number of Ag/Cu/Zn Alloy at Different Photon Energy by Compton Scattering Technique. *Procedia Engineer*. 2012;32:847-54.
16. Khobkham C, Limkitjaroenporn P, Shimada K, Kaewkhao J, Chaiphaksa W. Photon interaction behavior of zirconium alloy materials. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:14928-32.
17. Kumar A. Gamma ray shielding properties of $\text{PbO-Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ glasses. *Radiat Phys Chem*. 2017;136:50-3.
18. Chanthima N, Kaewkhao J. Investigation on radiation shielding parameters of bismuth borosilicate glass from 1 keV to 100 GeV. *Ann Nucl Energy*. 2013;55:23-8.
19. Kaur K, Singh KJ, Anand V. Structural properties of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ glasses for gamma ray shielding applications. *Radiat Phys Chem*. 2016;120:63-72.
20. El-bashir BO, Sayyed MI, Zaid MHM, Matori KA. Comprehensive study on physical, elastic

and shielding properties of ternary BaO-Bi₂O₃-P₂O₅ glasses as a potent radiation shielding material. J Non-Cryst Solids. 2017;468:92-9.

21. Dong MG, Sayyed MI, Lakshminarayana G, Çelikkilek Ersundu M, Ersundu AE, Nayar P, et al. Investigation of gamma radiation shielding properties of lithium zinc bismuth borate glasses using XCOM program and MCNP5 code. J Non-Cryst Solids. 2017;468:12-6.
22. Vishwanath PS, Badiger NM, Chanthima N, Kaewkhao J. Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. Radiat Phys Chem. 2014;98:14-21.
23. Oto B, Yıldız N, Korkut T, Kavaz E. Neutron shielding qualities and gamma ray buildup factors of concretes containing limonite ore. Nucl Eng Des. 2015;293:166-75.



ระบบแนะนำส่วนบุคคลโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และการคัดกรองสิ่งของร่วม

Personal Recommender System based on Agglomerative Clustering together with User-based and Item-based Collaborative Filtering Methods

รัฐวรรณ พันธุนิต และ นิเวศ จิระวิชิตชัย*

Ratawan Phantunin and Nivet Chirawichitchai*

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2410/2 ถนน พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Faculty of Information Technology, Sripatum University 241/2 Phaholyothin Road, Jatjak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author e-mail: aor.tv5@gmail.com, nivet.ch@spu.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 30 May, 2020

Revised: 5 June, 2020

Accepted: 22 June, 2020

Available online: 25 June, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.10

Keywords: recommender system, agglomerative clustering, user-based collaborative filtering, item-based collaborative filtering

The objective of this study is to develop and increase efficiency of Personal Integrated Recommender System. The Recommender System plays an important role and is crucial to our everyday lives in online shopping and online services. We will find that the thing that comes with when shopping for products or using services is to recommend products or services. A good Recommender System helps generate more sales. In the meantime, various problems could be found with the system, e.g. scalable data, data sparsity, data accuracy, and having a lot of new users. Therefore, new techniques have been introduced and integrated with the recommender system in order to solve the problems and improve for greater recommender system efficiency. In this study, an Agglomerative Clustering together with a User-base and Item-base Collaborative Filtering Method is proposed. By combining the strengths of each method, we can improve the recommender system efficiency and accuracy. This combination helps to solve the problems of scalable data, data sparsity, and having a lot of new users. The results show that it reduces the processing time and increases precision. Therefore, we can conclude that

the Personal Recommender System developed based on Agglomerative Clustering together with User-based and Item-based Collaborative Filtering Method has the ability to increase system efficiency and is applicable. It also helped to solve the problems of scalable data, data sparsity, and having a lot of new users. When modern technology arrives in the future, we may be able to use cloud computing for data analysis in order to expand the capacity to process the information efficiently.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองระบบแนะนำส่วนบุคคล ด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และการคัดกรองสิ่งของร่วม เนื่องมาจากในปัจจุบันระบบแนะนำได้มีบทบาทในชีวิตประจำวันในการเพิ่มยอดขายสินค้าและบริการออนไลน์เป็นอย่างมาก แต่ในขณะเดียวกันก็กลับพบปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบแนะนำข้อมูล เช่น ปัญหาของขนาดข้อมูล (Scalability Problem) ความเบาบางของข้อมูล (Sparsity Problem) ความแม่นยำของข้อมูล และการมีผู้ใช้รายใหม่เพิ่มเข้ามาเป็นจำนวนมาก (First-rater Problem) ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ ๆ มาผสมผสานกับระบบแนะนำ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบแนะนำให้ได้และตรงกับความต้องการของผู้ใช้อยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น (Agglomerative Clustering) ทำงานร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และวิธีแบบคัดกรองสิ่งของร่วม (User-based and Item-based Collaborative Filtering Method) โดยเอาจุดเด่นของแต่ละวิธีมาผสมผสานกัน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบแนะนำให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากผลการทดลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นพิจารณาจากค่าพื้นที่ใต้เส้นกราฟ ค่าความแม่นยำ ค่า Normalized discounted cumulative gain และค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ ให้ค่าที่สูงกว่าการใช้ User-based Collaborative Filtering หรือ Item-based

Collaborative Filtering เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองระบบแนะนำส่วนบุคคล ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และการคัดกรองสิ่งของร่วม มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ User-based Collaborative Filtering หรือ Item-based Collaborative Filtering เพียงอย่างเดียว และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง โดยในอนาคตเมื่อมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้นอาจจะสามารถใช้คลาวด์คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อขยายขีดความสามารถในการประมวลผลข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบแนะนำ วิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น วิธีแบบคัดกรองผู้ใช้ร่วม วิธีแบบคัดกรองสิ่งของร่วม

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันโลกกำลังก้าวเข้าสู่ยุคของข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ซึ่งเราจะเห็นได้ว่า ข้อมูลต่าง ๆ ที่เข้ามาในระบบฐานข้อมูลมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นแบบก้าวกระโดด จึงทำให้เกิดปัญหาขนาดของข้อมูล (Scalability Problem) ที่มีจำนวนมากและปัญหาการให้ Rating ต่อชิ้นข้อมูล (Sparsity Problem) ที่ผู้ใช้ให้ไว้ไม่เพียงพอต่อการคำนวณ ทำให้ผู้วิจัยมีความคิดที่จะพัฒนาระบบแนะนำข้อมูลส่วนบุคคล (Recommender System) โดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับขั้นตอนวิธีแบบคัดกรองผู้ใช้ร่วมและการคัดกรองสิ่งของขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น

ระบบแนะนำข้อมูล (Recommender System) (1) เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาคำแนะนำจากข้อมูลเพื่อนำความรู้เหล่านั้นไปประกอบการตัดสินใจให้กับผู้ใช้งาน เพื่อเพิ่มโอกาสให้กับผู้ซื้อหรือผู้ใช้งานที่ได้รับสินค้าหรือข้อมูลที่ตรงตามความต้องการ บริษัทที่ประสบความสำเร็จ เช่น Amazon Netflix และ Spotify ทุกบริษัทต่างใช้ ระบบที่เรียกว่า Recommender Systems โดยใช้เทคนิค Collaborative Filtering ซึ่งเป็นเทคนิคที่ประสบความสำเร็จและได้รับความนิยมอย่างสูงสำหรับการพัฒนาระบบแนะนำ (2) เช่น ระบบแนะนำภาพยนตร์ เนื่องจากผู้ใช้งานไม่สามารถศึกษารายละเอียดของภาพยนตร์ทุก ๆ เรื่องที่มีอยู่ในฐานข้อมูลได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด ทั้งเป็นการสร้างประสบการณ์ที่ดีให้กับผู้ใช้ เพิ่มความพึงพอใจ รวมไปถึงเพิ่มยอดขายได้อย่างเห็นผลจริง

นอกจากนี้แล้ว จากการศึกษาของระบบแนะนำข้อมูล พบว่าหากผู้ใช้มีจำนวนมากขึ้นจะทำให้เกิดปัญหาของอัลกอริทึม เช่น ขนาดของข้อมูลซึ่งมีวิธีแก้ปัญหาโดยการใช้การจัดกลุ่ม (Clustering) ในการแบ่งกลุ่มผู้ใช้งานก่อนเข้าสู่การทำงานของระบบเพื่อให้ได้คำแนะนำกับผู้ใช้ได้เร็วขึ้น และปัญหาต่อมาคือปัญหาการให้ค่าอันดับคะแนน (Rating) ต่อชิ้นข้อมูล เพราะเมื่อข้อมูลมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถให้คะแนนได้อย่างทั่วถึง ทำให้มีค่าอันดับคะแนน (Rating) ไม่เพียงพอต่อการคำนวณ ทำให้มีผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้ใช้ ที่มีต่อระบบ (3) จากการศึกษาพบว่า มีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล (Data mining) เช่น เทคนิค Clustering เทคนิค Classification เป็นต้น

จากความเป็นมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงพัฒนาแบบจำลองระบบแนะนำส่วนบุคคลโดยใช้โดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น (Agglomerative Clustering) ร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้งานกับการคัดกรองสิ่งของ (User-based and Item-based Collaborative Filtering Method) โดยนำจุดเด่นของแต่ละวิธีมาผสมผสานกันและนำมา

ทดลองใช้ในการแนะนำภาพยนตร์ต่อผู้ใช้งานระบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานได้รับการแนะนำที่มีประสิทธิภาพตรงตามต้องการ ถูกต้อง และพึงพอใจที่สุด

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาและวิเคราะห์ปัญหา โดยแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบแนะนำแบบผสมผสาน (Hybrid) โดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้น (Agglomerative Clustering) ร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้และการคัดกรองสิ่งของ โดยวิธีการคัดกรองผู้ใช้ (User-based Collaborative Filtering) มีจุดเด่นคือจะพิจารณาความเหมือนของผู้ใช้งานในระบบกับความชอบที่เคยมีมาก่อนและ วิธีการคัดกรองสิ่งของ (Item-based Collaborative Filtering) มีจุดเด่นคือจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งของได้ดีกว่า User-based โดยปกติระบบแนะนำประเภทนี้จะมีขั้นตอนในการประมวลผล 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้ 1. สร้างประวัติผู้ใช้หรือข้อมูลที่จะใช้เป็นพื้นฐานของระบบ 2. คัดเลือกผู้ใช้ที่เคยเลือกข้อมูลนั้น (co-rated item) หรือข้อมูลที่เคยถูกเลือกจากผู้ใช้งานดังกล่าว (co-user rate) ที่มีความใกล้เคียงหรือคล้ายคลึงกันขึ้นมาตามจำนวนที่กำหนดไว้ โดยการเปรียบเทียบประวัติผู้ใช้ หรือข้อมูลที่ใช้เป็นพื้นฐานของระบบ ซึ่งอาจใช้ค่าความเหมือนโคไซน์ (Cosine Similarity) (8) เพื่อคำนวณว่าผู้ใช้และข้อมูลนั้นมีความเหมาะสมกันมากน้อยเพียงใด

ข้อมูลในการทดลองงานวิจัยครั้งนี้ เป็นชุดข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้สร้างฐานข้อมูลของระบบและใช้ในการจัดกลุ่มผู้ใช้ โดยนำข้อมูลมาจาก MovieLens Project 1M Dataset มาใช้ ชุดข้อมูลประกอบด้วย

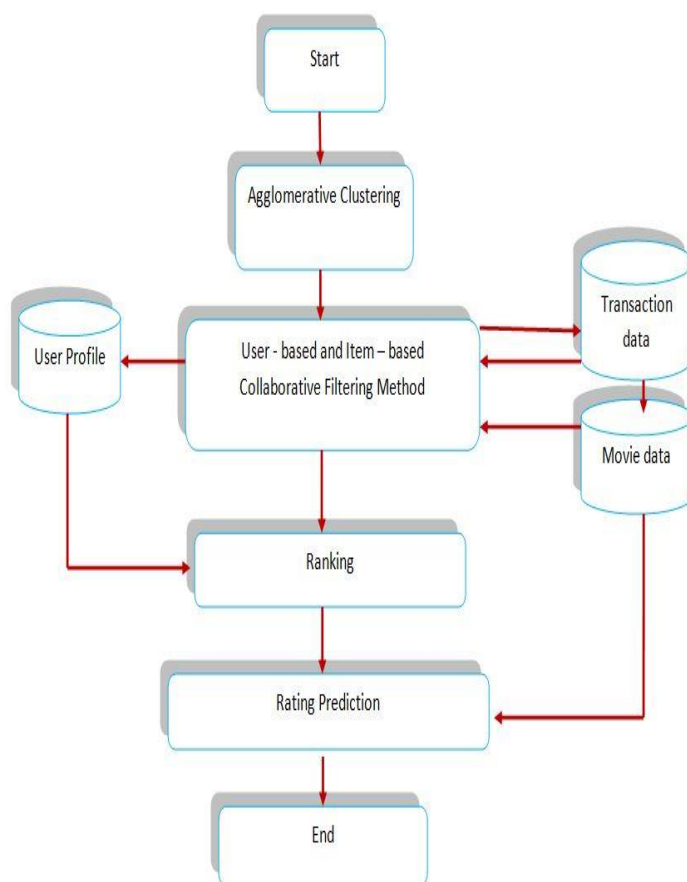
1. ชุดข้อมูลการให้คะแนนการจัดอันดับภาพยนตร์ (Rating) จำนวน 1,000,209 Records จากการเก็บรวบรวมข้อมูลผู้ใช้งาน จำนวน 6,040 คน และภาพยนตร์จำนวน 3,883 เรื่อง

2. ชุดข้อมูลผู้ใช้ระบบ (User Profile) ประกอบด้วย เพศ อายุ อาชีพ (21 อาชีพ) รหัสไปรษณีย์

3. ประเภทของภาพยนตร์ (Item Feature) ประกอบไปด้วย ชื่อเรื่อง วันที่ฉาย วันที่เป็นวิดีโอ รหัสภาพยนตร์ และประเภทภาพยนตร์(19 ประเภท) เช่น แอ็คชั่น ผจญภัย ตลก ดราม่า สงคราม เป็นต้น

ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นกลุ่มตัวอย่างที่เกิดจากการเก็บข้อมูลจริง โดยผู้ใช้งานได้เข้าไปให้ข้อมูลใน MovieLens Project เกี่ยวกับภาพยนตร์ที่เคยชมแล้ว โดยชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยไฟล์ข้อความซึ่งใช้การเข้ารหัสอักขรแบบ ANSI จำนวน 3 ไฟล์ได้แก่ Ratings.dat, Movies.dat และ Users.dat จากนั้นจึงทำการออกแบบและศึกษาการทำงานของอัลกอริทึม Collaborative Filtering ลำดับขั้นตอนการทำงาน การประยุกต์ใช้วิธีการทำเหมืองข้อมูลและวิธีทางสถิติ มาช่วยในการหาความคล้ายคลึงกันของผู้ใช้แต่ละคน โดยใช้ขั้นตอนวิธี

แบบคัดกรองผู้ใช้ร่วมกับแบบคัดกรองสิ่งของร่วมกัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัญหาที่เกิดจาก Collaborative Filtering แบบดั้งเดิมว่ามีปัญหาใหญ่อยู่ที่เรื่องของขนาดของข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และ การท่วมท้นของข้อมูล (Information overload) ทำให้ประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานลดลง ผู้พัฒนาจึงได้ศึกษาอัลกอริทึม User-based and Item-based Collaborative Filtering เพิ่มเติมเพื่อมาช่วยแก้ปัญหานี้ ร่วมกับอัลกอริทึม Agglomerative Clustering แบบผสมผสานซึ่งจัดเป็นเทคนิคใหม่ในการนำเสนอระบบแนะนำข้อมูลส่วนบุคคลที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความแม่นยำมากขึ้นจากการศึกษาปัญหาและรวบรวมข้อมูล ผู้พัฒนาได้ออกแบบขั้นตอนวิธีในการทำวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีระบบแนะนำส่วนบุคคลโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้กับการคัดกรองสิ่งของร่วม

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

งานวิจัยการพัฒนาระบบแนะนำส่วนบุคคลโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้กับการคัดกรองสิ่งของนี้ พิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวัดจากค่า AUC (Area Under the Curve), prec (Precision), ค่า NDCG (Normalized Discounted Cumulative Gain), ค่า MAP (Mean Average Precision) ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้ (4-6)

1. ค่าพื้นที่ใต้เส้นกราฟ (Area under the Curve: AUC) เป็นการวัด ประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองโดยที่เส้น ในแกนนอนจะเป็นอัตราบวกจริง (True Positive Rate) ส่วนในแกนตั้งจะเป็นอัตราบวกเท็จ (False positive rate) ค่าการวัดโดยใช้ AUC นี้จะเริ่มที่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 หมายถึง แบบจำลองนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ ส่วน 1 หมายถึง แบบจำลอง นั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งผลการวัดจะง่ายต่อความเข้าใจ

2. ค่าความแม่นยำ (Precision: prec) (6) กล่าวว่าเป็นการวัดความแม่นยำของระบบในการค้นหาเอกสารที่เกี่ยวข้องกันได้อย่างถูกต้อง ได้ผลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการสืบค้น

Doc	Action	
	Retrieved	Not Retrieved
Relevant	tp	fn
Not Relevant	fp	tn

ค่า Precision = $tp/(tp+fp)$

3. ค่า Normalized Discounted Cumulative Gain: NDCG เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการประเมินผล Search Engine มีการให้ระดับคะแนนความเกี่ยวข้องของเอกสารรวมทั้งพิจารณาลำดับของผลการค้นหา (Ranking) และ DCG เป็นการวัดความเหมาะสมของเอกสารโดยสนใจตำแหน่งหรือลำดับของเอกสาร ค่าระดับคะแนนที่ได้รับจะสะสมจากลำดับบนของรายการผลลัพธ์การค้นหาไปยังลำดับล่างของผลลัพธ์การค้นหา โดยค่าคะแนนจะลดลงเมื่อ

ผลความพึงพอใจอยู่ในลำดับที่ต่ำ (7, 8) โดยสมการ NDCG เป็นดังนี้

$$NDCG_q = M_q \sum_{j=1}^k \frac{(2^{r(j)} - 1)}{\log(1+j)} \quad (1)$$

เมื่อ k คือ ระดับหรือเกณฑ์ที่ใช้

$r(j)$ คือ ค่าลำดับความเกี่ยวข้องของเอกสารที่ได้จากกระประเมินโดยผู้ใช้

M_q คือ ค่าคงที่ที่เกิดจากความสมบูรณ์ในการจัดลำดับโดยมีค่ามากที่สุด คือ 1

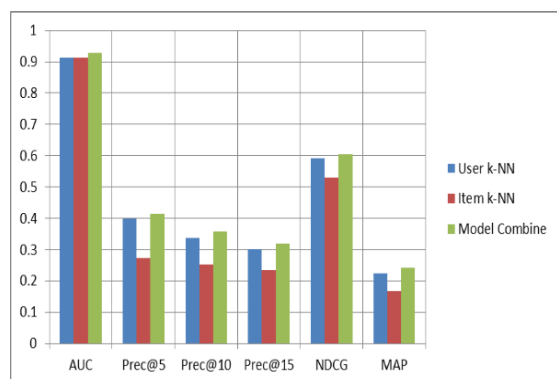
ทั้งนี้ NDCG จะให้รางวัลกับเอกสารที่เกี่ยวข้องที่ปรากฏในลำดับของการจัดอันดับผลการค้นหาและลงโทษเอกสารที่ไม่เกี่ยวข้องโดยการลดคะแนน NDCG

4. ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ (Mean Average Precision: MAP) เป็นค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ ของคำค้นหลาย ๆ คำที่เกี่ยวข้องกัน (Relevance) และนำไปจัดอันดับโดยมีสูตรดังนี้

$$MAP = \frac{\sum_{q=1}^Q AveP(q)}{Q} \quad (2)$$

ตารางที่ 2 ผลการทดลองในกรณีใช้วิธีขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มแบบลำดับขั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้กับแบบคัดกรองสิ่งของ จำแนกแบบตาราง

Metrics	User	Item	Model
	k-NN	k-NN	Combiner
AUC	0.913	0.912	0.928
Prec@5	0.398	0.272	0.415
Prec@10	0.338	0.252	0.358
Prec@15	0.301	0.234	0.320
NDCG	0.591	0.530	0.604
MAP	0.223	0.167	0.241



รูปที่ 2 ผลการทดลองการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้งานกับการคัดกรองสิ่งของร่วม

จากการทดลองพบว่า วิธีผสมผสานระหว่างเทคนิคโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับชั้นร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้งานกับการคัดกรองสิ่งของร่วม (Model Combiner) พบว่าได้ค่าพื้นที่ใต้เส้นกราฟ (Area Under the Curve: AUC) มีค่าเท่ากับ 0.928 ค่าความแม่นยำ (Precision:prec) ที่ k@5 มีค่าเท่ากับ 0.415 ที่ k@10 มีค่าเท่ากับ 0.358 ที่ k@15 มีค่าเท่ากับ 0.320 ค่า Normalized discounted cumulative gain: NDCG มีค่าเท่ากับ 0.604 ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ (Mean Average Precision : MAP) มีค่าเท่ากับ 0.241 ซึ่งทุกค่าที่ได้มาสูงกว่าค่าที่มาจากวิธีการคัดกรองผู้ใช้งาน (User-based Collaborative Filtering) และวิธีการคัดกรองสิ่งของร่วม (Item-based Collaborative Filtering) เพียงอย่างเดียวอย่างชัดเจน

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบแนะนำโดยใช้เทคนิคการผสมผสานกันโดยใช้การจัดกลุ่มแบบลำดับชั้น (Agglomerative Clustering) ร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้งานและการคัดกรองสิ่งของร่วม (User-based and Item-based Collaborative Filtering) เป็นการเอาจุดเด่นของแต่ละวิธีมาผสมผสานกัน ส่งผลให้ระบบแนะนำข้อมูลที่น่าเสนอมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในทุกตัวชี้วัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการจัดกลุ่มแบบลำดับชั้น

(Agglomerative Clustering) ร่วมกับวิธีการคัดกรองผู้ใช้งานและการคัดกรองสิ่งของร่วม (User-based and Item-based Collaborative Filtering) สามารถสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ใช้ระบบได้แม่นยำ สูงขึ้นกว่าระบบแนะนำส่วนบุคคลที่ใช้เทคนิคคัดกรองผู้ใช้งานหรือคัดกรองสิ่งของร่วมเพียงอย่างเดียว และช่วยแก้ปัญหาขนาดของข้อมูล (Scalability Problem) ที่มีจำนวนมาก ปัญหาชั้นข้อมูลที่ไม่มีการให้ Rating ไว้ (First-rater Problem) ปัญหาการแยกแยะ Rating (Transparency Problem) และปัญหาการให้ Rating ต่อชิ้นข้อมูล (Sparsity Problem) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Adomavicius G, Tuzhilin A. Recommendation Technologies: Survey of Current Methods and Possible Extensions: Stern School of Business, New York University; 2004.IS-03-06.
2. Sarwar BM, Karypis G, Konstan JA, Riedl JT. Analysis of Recommendation Algorithms for E-commerce: ACM. In: Proceedings of the 2nd ACM; 2000 October; Minneapolis Minnesota USA, New York: Association for Computing Machinery; 2000. p. 158-67.
3. Shyu ML, Haruechaiyasak C, Chen SC, Zhao N. Collaborative filtering by mining association rules from user access sequences. In: Proceedings - International Workshop on Challenges in Web Information Retrieval and Integration, WIRI'05; 2005 April 8-9; Tokyo, Japan. 2005. p. 128-33.
4. Aljumily R. Agglomerative Hierarchical Clustering: An Introduction to Essentials (1)

Proximity Coefficients and Creation of a Vector-Distance Matrix and (2) Construction of the Hierarchical Tree and a Selection of Methods. *Global Journal of Human Social Science Research*. 2016;16(3-G):23-50.

5. Janpla S, Wanapiron P. System framework for an intelligent question bank and examination system. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2018; 8(5):488-94.
6. Fawcett T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn Lett*. 2006;27(8): 861–74.
7. Smoot BJ, Wong JF, Dodd MJ. Comparison of Diagnostic Accuracy of Clinical Measures of Breast Cancer–Related Lymphedema: Area Under the Curve. *Arch Phys Med Rehab*. 2011;92(4): 603-10.
8. Chirawichitchai N. Developing term weighting scheme based on term occurrence ratio for sentiment analysis. In: Kim, Kuinam J, editor. *Information Science and Applications*. 1st ed. Springer eBook: Springer Nature; 2015. p. 737–44.



การศึกษาและทดสอบเครื่องตัดใบบัวหลวง

Study and Testing of Lotus Leaves Cutting Machine

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์* สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ เกรียงไกร แซมสีม่วง และ เอกชัย บัวคลี

Jaturong Langkapin*, Sunan Parnsakhorn, Roongruang Kalsirisilp, Grianggai Samseemoung and Akachai Buaklee

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: jaturong.l@en.rmutt.ac.th

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	This research aimed to design and to fabricate a lotus leave
Received: 5 May, 2020	cutting machine prototype that can reduce the processing time and
Revised: 11 June, 2020	labor cost in the lotus leaf cutting process for better lotus leave tea
Accepted: 19 June, 2020	production. This prototype consists of the main frame, conveyor
Available online: 25 June, 2020	unit, cutting unit, Geneva mechanism, power transmission unit and
DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.11	a prime mover by 150W-gear-motor. The power of the machine
<i>Keywords:</i> lotus, lotus	started when the operator input the lotus leaves into the hind
leaves, lotus leaves	feeder of the machine. Then the lotus leaves were transported into
cutting machine, design	the cutter set processed by the Geneva mechanism. The cutter set
	could cut the lotus leaves along the horizontal axis. After that, the
	lotus leaves were cut into pieces of 4x4 centimeter and released
	down to the outlet in front of the machine. The results revealed
	that the best average cutting speed of blade was 1 meter/minute in
	5 layers of lotus leaves among all the trials at different average
	cutting speed rates of blades 0.5, 0.75 and 1 meter/minute and
	numbers of 1, 2, 3, 4 and 5 layers, respectively. The cutting
	percentage was 98.9 % with 1.1 % leaf damage and a working
	capacity of 8.58 kilograms/hour that consumed 92.4 Watt-hours. The

engineering economic analysis showed that on average it cost 5.24 baht/kilogram of lotus leaves at 1,440 hours/year with a 2.8 month payback period and 81.1 hours/year for a break-even point. This prototype could work 4.3 times faster than human labor.

บทคัดย่อ

เครื่องตัดใบบัวหลวงถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อลดเวลาและแรงงานในการตัดใบบัวหลวงสำหรับผลิตชาใบบัวหลวง เครื่องต้นแบบประกอบด้วย โครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนลำเลียง ชุดตัดใบบัวหลวง กลไกเจนิวา และระบบส่งกำลัง โดยใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 150 วัตต์เป็นต้นกำลัง การทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ควบคุมเครื่องป้อนใบบัวหลวงลงในช่องป้อนทางด้านหลังของเครื่อง หลังจากนั้นใบบัวหลวงจะถูกลำเลียงเข้าไปในชุดใบมีดตัดโดยการเคลื่อนที่ของกลไกเจนิวา ซึ่งชุดใบมีดตัดทำหน้าที่ตัดใบบัวหลวงให้ได้ขนาด 4x4 เซนติเมตร และปล่อยให้ใบบัวหลวงที่ถูกตัดร่วงสู่ช่องทางออกทางด้านหน้าของเครื่อง จากการทดสอบที่ความเร็วตัดของชุดลำเลียงใบบัวหลวงที่ 0.50 0.75 และ 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของใบบัวหลวง 1 2 3 4 และ 5 ชั้น ตามลำดับ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุด ที่ความเร็วของชุดตัดลำเลียงใบบัวหลวง 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นใบบัวหลวง 5 ชั้น ด้วยความสามารถในการทำงาน 8.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง 98.9 % เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 1.1 % การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 92.4 วัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องตัดใบบัวหลวง 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 5.24 บาทต่อกิโลกรัมใบบัวหลวง ระยะคืนทุน 2.8 เดือน จุดคุ้มทุน 81.1 ชั่วโมงต่อปี และเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้เร็วกว่าแรงงานคน 4.3 เท่า

คำสำคัญ: บัวหลวง ใบบัวหลวง เครื่องตัดใบบัวหลวง การออกแบบ

บทนำ

ปัจจุบันการทำนาข้าวประสบปัญหาทั้งภัยแล้งและราคาข้าวไม่แน่นอน เกษตรกรจำนวนมากในหลายจังหวัดได้เปลี่ยนมายึดการปลูกบัวเป็นอาชีพหลักแทนการปลูกข้าว เนื่องจากนาบัวเป็นทางเลือกใหม่ทางหนึ่งที่เหมาะสมกับพื้นที่นาข้าว อีกทั้งนาบ้วยังสามารถดูแลรักษาง่ายกว่านาข้าว มีโรคและแมลงรบกวนน้อย ต้นบัวหลวงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนตั้งแต่รากจนถึงใบ โดยเฉพาะดอกตูมและเมล็ดเป็นที่ต้องการของทั้งในประเทศและต่างประเทศ นอกจากนี้ภาครัฐยังได้สนับสนุนให้ปลูกบัวหลวงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมซึ่งไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้ เนื่องจากบัวหลวงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ของประเทศไทย (1, 2, 3)

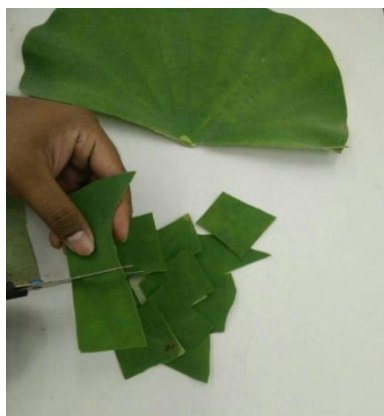
ใบบัวหลวงสามารถนำไปทำใบบัวอบแห้งสำหรับห่อข้าวเพื่อใช้ในร้านอาหาร ภัตตาคาร หรือการส่งออก นอกจากนั้นกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต่าง ๆ ได้นำใบบัวหลวงไปแปรรูปเป็นชาใบบัว เช่น กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์บัวกว้านพะเยา (รูปที่ 1) หรือกลุ่มเกษตรกรสวนบัวลัดดา ผู้ผลิตชาใบบัวจำหน่าย เป็นต้น ซึ่งชาใบบัวมีสรรพคุณช่วยบำรุงร่างกาย บำรุงโลหิต ลดไขมันในเลือด บรรเทาอาการหวัด และช่วยลดเสมหะ (4, 5, 6, 7)

ขั้นตอนการผลิตชาใบบัวเพื่อจำหน่ายในปัจจุบัน เริ่มจากการล้างใบบัวให้สะอาด ตัดหรือหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 3-5 เซนติเมตร (รูปที่ 2) นำไปตากหรืออบให้แห้ง แล้วบรรจุในบรรจุภัณฑ์พร้อมส่งจำหน่าย ซึ่งขั้นตอนการตัดยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก อีกทั้งยังไม่มีการใช้เครื่องจักรในขั้นตอนนี้ จึงทำให้เกิดความล่าช้าและใช้แรงงานในการหั่นใบบัวจำนวนมากในกรณีที่มีความต้องการสูง ดังนั้นเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิต

ผลิตภัณฑ์ชาใบบัวของวิสาหกิจชุมชนให้สูงขึ้นและช่วยลดปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตัดใบบัวหลวงสำหรับการผลิตชาใบบัว



รูปที่ 1 กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์ชาใบบัววันพะเยา (7)



รูปที่ 2 การตัดใบบัวหลวงด้วยแรงงานคน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในการออกแบบและสร้างเครื่องตัดใบบัวหลวงสำหรับบัวหลวงที่ปลูกในประเทศไทย ซึ่งมีระเบียบวิธีการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

ศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ

1. ศึกษาปัญหาและวิธีการตัดใบบัวหลวง

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและวิธีการตัดใบบัวหลวงของเกษตรกรในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบและเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องตัดใบบัวหลวงให้สอดคล้องกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการ

สัมภาษณ์กลุ่มเกษตรกรสวนบัวลัดดา ผู้ผลิตชาใบบัวจำหน่าย ตั้งอยู่ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ได้ผลการศึกษา ดังนี้

- แรงงานในกระบวนการผลิตมาจากแรงงานในชุมชน ซึ่งในปัจจุบันจำนวนแรงงานมีจำนวนลดลง

- ค่าจ้างแรงงานสำหรับตัดใบบัว 300-350 บาทต่อวัน

- ปริมาณชาใบที่ผลิตขึ้นอยู่กับคำสั่งซื้อของลูกค้า

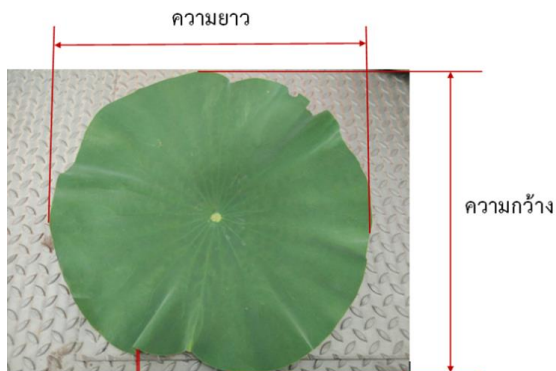
- แรงงาน 1 คนตัดใบบัวหลวงได้ประมาณ 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 16 กิโลกรัมต่อวัน (ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง) การตัดใบบัวจะใช้มีดหรือกรรไกร ตัดครั้งละ 1-2 ใบ ซ้อนกันแล้วแต่ความชำนาญของคนตัด ตัดใบบัวหลวงขนาดเฉลี่ย 4x4 เซนติเมตร ซึ่งขนาดจะไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการเป็นปรมาณขนาดของผู้ตัด

- ปัญหาที่พบในขั้นตอนการตัดใบบัวหลวง คือ ความเมื่อยล้าในการทำงาน ความไม่ปลอดภัยในการทำงาน เช่น เกิดอุบัติเหตุจากมีดบาด และการขาดแคลนแรงงานเมื่อต้องการกำลังผลิตสูง

2. ลักษณะทางกายภาพของใบบัวหลวง

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของใบบัวหลวงสำหรับใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ได้แก่ ความยาว ความกว้าง และความหนาของใบบัวหลวง ดังรูปที่ 3 และความชื้นของใบบัวหลวง (การหาความชื้นจะหาตามวิธีของ AOAC (8)) ซึ่งใบบัวหลวงแห้งที่สวนบัวลัดดา จังหวัดพระนครศรีอยุธยาผลิตจำหน่ายจะมี 3 ขนาด คือ ใบบัวหลวงแห้งขนาดเฉลี่ย 10 15 และ 20 เซนติเมตร เพื่อให้เครื่องต้นแบบสามารถใช้กับใบบัวหลวงทุกขนาด ดังนั้นจึงศึกษาใบบัวหลวงสดที่ใช้ผลิตใบบัวหลวงแห้งขนาด 20 เซนติเมตร จากการสุ่มวัดขนาดใบบัวหลวงสดจำนวน 100 ใบ จากสวนบัวลัดดา ตามตำแหน่งดังรูปที่ 3 ใบละ 1 ครั้ง ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ พบว่าความยาวและความกว้างของใบบัวหลวงสดมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง

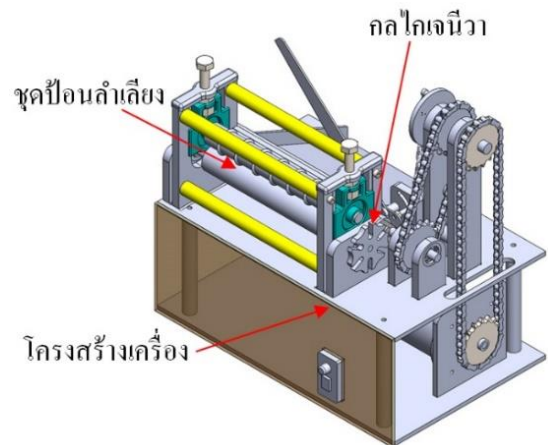
25-35 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 30 ± 5 เซนติเมตร ส่วนความหนาใบบัวหลวงมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-1.4 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.25 ± 0.1 มิลลิเมตร และความชื้นของใบบัวหลวงสด 77.5 % w.b. ซึ่งค่าความยาวและกว้างของใบบัวหลวงจะถูกนำไปออกแบบความยาวของชุดใบมีดตัด



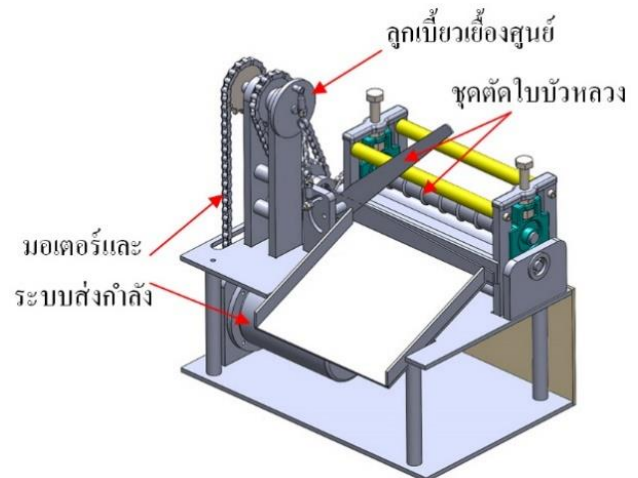
รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดลักษณะทางกายภาพของใบบัวหลวง ออกแบบและสร้างเครื่องตัดใบบัวหลวง

เครื่องตัดใบบัวหลวงได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบแล้ว ยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลและเครื่องจักรกลเกษตร (9, 10, 11) รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ (12) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) คือ โครงสร้างเครื่อง ชุดป้อนลำเลียงใบบัว ชุดตัดใบบัว ระบบส่งกำลัง และโดยใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 150 วัตต์ เป็นต้นกำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

โครงสร้างเครื่อง ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบ มีขนาด 362x556x531 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) สร้างจากอะลูมิเนียม เชื่อมประกอบกันเป็นโครงสร้าง โดยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกยึดเข้ากับโครงสร้างด้วยน็อตและสกรู



ก) แบบเครื่องต้นแบบด้านหลังของเครื่อง



ข) แบบเครื่องต้นแบบด้านหน้าของเครื่อง



ค) เครื่องตัดใบบัวหลวง

รูปที่ 4 แบบและเครื่องตัดใบบัวหลวงต้นแบบ

ชุดป้อนลำเลียงใบบัว ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก โดยลูกกลิ้งตัวล่างถูกขับเคลื่อนด้วยกลไกล้อเจนิวา 6 ร่อง ส่วนลูกกลิ้งตัวบนจะมีชุดใบมีดร้อยอยู่บนลูกกลิ้ง และติดตั้งบนอุปกรณ์ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ซึ่งชุดป้อนลำเลียงใบบัวจะทำหน้าที่ตัดใบบัวตามแนวยาว ขนาด 4 เซนติเมตร และป้อนใบบัวเข้าสู่ชุดตัดใบบัว เพื่อความแม่นยำในการตัดใบบัวหลวงและการเคลื่อนที่ของกลไกจึงใช้โซ่และเฟืองโซ่เป็นระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 150 วัตต์ เป็นต้นกำลัง

ชุดตัดใบบัวหลวง ประกอบด้วยใบมีดตัดทำจากสแตนเลส ทำหน้าที่โดยตัดใบบัวที่ถูกลำเลียงมาจากชุดป้อนลำเลียงใบบัวตามแนวขวาง ใช้กลไกควบคุมการตัดแบบลูกเบี้ยวเอียงศูนย์ ซึ่งกลไกนี้จะทำงานสัมพันธ์กับกลไกล้อเจนิวา 6 ร่อง

หลักการทำงานของเครื่อง เริ่มจากผู้ทำงานป้อนใบบัวหลวงในช่องป้อนใบบัวทางด้านหลังของเครื่องเข้าสู่ชุดป้อนลำเลียง ซึ่งชุดป้อนลำเลียงใบบัวจะทำหน้าที่ตัดใบบัวตามแนวยาวขนาด 4 เซนติเมตร และป้อนใบบัวหลวงเข้าสู่ชุดตัดใบบัว หลังจากนั้นใบบัวหลวงจะถูกตัดในชุดตัดใบบัวหลวงตามแนวขวางให้ได้ขนาด 4 เซนติเมตร ใบบัวหลวงที่ถูกตัดแล้วจะร่วงลงสู่ถาดรองรับทางด้านหน้าของเครื่อง ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 4 (ค) และปัจจุบันเครื่องต้นแบบได้จดอนุสิทธิบัตรเรียบร้อยแล้ว (เลขที่อนุสิทธิบัตร 15593)

ทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องต้นแบบ

เครื่องตัดใบบัวหลวงได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งความคุณภาพของการตัดใบบัวหลวง โดยใช้ เปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ความสามารถในการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เป็นค่าชี้ผลการศึกษาดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$C_t = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_t = เปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง (%)

W_1 = น้ำหนักของใบบัวหลวงที่มีขนาดถูกต้องหลังการตัด (kg)

W = น้ำหนักใบบัวหลวงทั้งหมด (kg)

2. เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$D_g = \frac{W_2}{W} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ D_g = เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย (%)

W_2 = น้ำหนักของใบบัวหลวงที่เสียหาย (kg)

โดยใบบัวหลวงที่ตัดไม่ได้ตามขนาดที่กำหนดในการทดสอบเครื่องต้นแบบ ถือว่าเป็นใบบัวที่เสียหาย

3. ความสามารถในการทำงานจริง คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$C_a = \frac{W_1}{T} \quad (3)$$

เมื่อ C_a = ความสามารถในการทำงานจริง (kg/hr)

T = เวลาในการทำงานทั้งหมด (hr)

โดยใช้ เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Adam รุ่น AFP-3100L วัดค่าน้ำหนักของใบบัวหลวง และใช้นาฬิกา CASIO รุ่น HS-3V จับเวลาในการทำงาน

4. การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$P = \frac{IVt}{1000} \quad (4)$$

เมื่อ P = การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kW-hr)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

t = เวลา (ชั่วโมง)

โดยใช้ ดิจิตอลแคลมป์ มัลติมิเตอร์ วัดค่า กระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะการทดสอบของแต่ละปัจจัย

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าต้องเดินเครื่องที่อัตราป้อนของเพลาชับล้อเจนิวา (ความเร็วของชุดลำเลียง) น้อยกว่า 1 เมตรต่อนาที ซึ่งถ้าความเร็วของเพลาชับล้อเจนิวาสูงเกินไป ใบพัดหลวงจะถูกป้อนเข้าชุดตัดใบเร็วเกินไปทำให้เปอร์เซ็นต์การตัดใบพัดหลวงลดลง ส่วนจำนวนชั้นของใบพัดหลวงถ้าซ้อนกันมากเกินไปเกินกว่า 5 ชั้น ใบมีดจะตัดใบพัดส่วนใหญ่ไม่ขาด ดังนั้นปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วของชุดลำเลียงใบพัดหลวงที่ 0.50 0.75 และ 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของใบพัดหลวงที่ใช้ทดสอบ 1 2 3 4 และ 5 ชั้นตามลำดับ

การทดสอบใช้ใบพัดหลวงพันธุ์ปทุมตลอดการทดสอบ ใบพัดหลวงที่มีความยาวและความกว้างของใบใกล้เคียงกันระหว่าง 23-34 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 29 ± 4.5 เซนติเมตร ส่วนความหนาใบพัดหลวงมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-1.4 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.24 ± 0.1 มิลลิเมตร โดยแต่ละการทดสอบใช้ใบพัดหลวง 5 ชุด ชั่งน้ำหนักใบพัดหลวงแต่ละชุด ทดสอบโดยการป้อนอย่างต่อเนื่อง และบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด กระแสไฟฟ้า น้ำหนักใบบัวที่ตัดออกมาจากช่องทางออก และน้ำหนักใบบัวที่เสียหาย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าชี้ผลการศึกษา ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95 % (One-way Analysis of Variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

1. การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย
วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องตัดใบพัดหลวง สมมติว่าเกษตรกรซื้อเครื่องตัดใบพัดหลวงแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องตัดใบพัดหลวงได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 %) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการตัดใบพัดหลวง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับค่าประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องไปทำงานตามสถานที่ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการตัดใบพัดหลวง ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาและค่าซ่อมแซม เป็นต้น (13)

2. การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-Back Period)

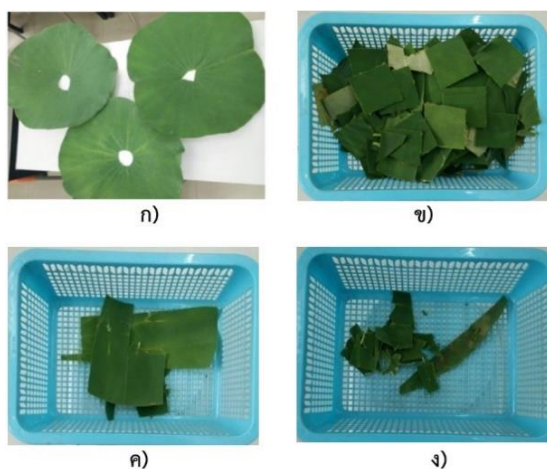
เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อลงทุนใช้เครื่องตัดใบพัดหลวงไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะกี่ปี โดยคิดจากราคาในการลงทุนซื้อเครื่องตัดใบพัดหลวงหารกับผลประโยชน์สุทธิที่คาดว่าจะได้รับในการใช้งานเครื่องตัดใบพัดหลวง 5 ปี (13)

3. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-Even Point)

เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการใช้เครื่องตัดใบพัดหลวงต้นแบบ โดยการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนในการตัดใบพัดหลวงจากการใช้เครื่องต้นแบบและการตัดใบพัดหลวงด้วยแรงงานคน (13)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

รูปที่ 5 ก) แสดงใบบัวหลวงก่อนการทดสอบ ต้องตัดส่วนที่เป็นก้านออกก่อน (การตัดด้วยแรงงานคน จะตัดส่วนนี้ทิ้งเช่นกัน) หลังจากนั้นนำไปทดสอบด้วย เครื่องตัดใบบัวหลวงแล้ว จะได้ใบบัวหลวงที่มีขนาด ค่อนข้างสม่ำเสมอ 4x4 เซนติเมตร (รูปที่ 5 ข) สามารถ ที่จะนำไปอบแห้งเพื่อจำหน่ายเป็นชาใบบัวได้เลย สำหรับใบบัวหลวงที่ตัดไม่ขาด (รูปที่ 5 ค) ต้องใช้ แรงงานคนมาตัดใหม่อีกครั้ง ส่วนใบบัวหลวงที่ตัดไม่ได้ ขนาดซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นใบบัวหลวงที่เป็นเศษเหลือ ตามบริเวณขอบใบบัว (รูปที่ 5 ง) ในการทดสอบ เครื่องต้นแบบ ถือว่าเป็นใบบัวที่เสียหาย โดยสามารถ นำไปผลิตเป็นชาใบบัวแบบหั่นฝอยได้แต่ราคาจะถูก กว่าใบบัวหลวงที่ตัดได้ตามขนาด



รูปที่ 5 ก) ใบบัวหลวงก่อนการทดสอบ ข) ใบบัวหลวงที่ได้จากการทดสอบ ค) ใบบัวหลวงที่ตัดไม่ขาด และ ง) ใบบัวหลวงที่ตัดไม่ได้ขนาด

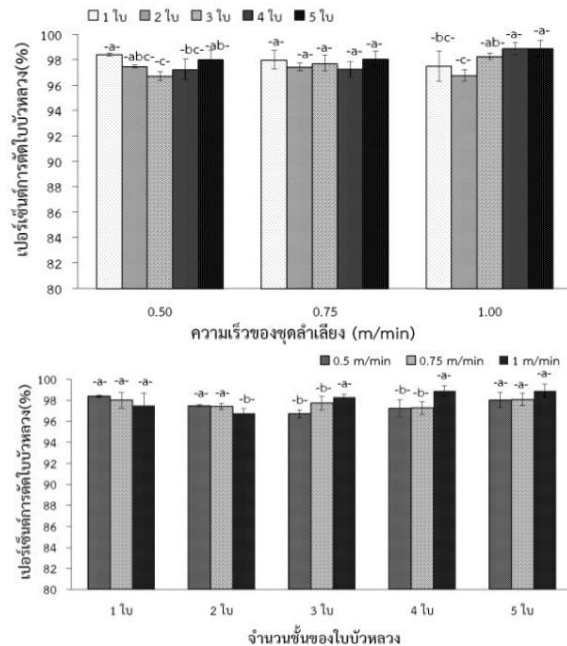
ซึ่งผลการทดสอบเครื่องตัดใบบัวหลวงที่ ความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นของใบบัวหลวง ต่าง ๆ จะนำเสนอตามค่าชี้ผลการศึกษา ดังนี้

เปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง

จากผลการทดสอบเครื่องตัดใบบัวหลวงดัง รูปที่ 6 ที่ความเร็วของชุดลำเลียงใบบัวหลวง 0.50, 0.75 และ 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของใบบัว หลวงที่ใช้ทดสอบ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั้น ตามลำดับ พบว่าทุกช่วงของการทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การตัดใบ บัวหลวงระหว่าง 96.7- 98.9 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ ใกล้เคียงกันและเครื่องต้นแบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การตัด เป็นที่น่าพอใจ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังรูปที่ 6 ใน กรณีสที่ทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลำเลียงในกลุ่ม เดียวกัน พบว่าจำนวนชั้นของใบบัวหลวง ไม่มีความ แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการ ทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลำเลียง 0.75 เมตรต่อ นาที แต่มีความแตกต่างกันที่ความเร็วของชุดลำเลียง 0.50 และ 1 เมตรต่อนาที ส่วนในกรณีที่ทดสอบโดยใช้ จำนวนชั้นของใบบัวหลวงในกลุ่มเดียวกัน พบว่า ความเร็วของชุดลำเลียง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้จำนวนชั้น ของใบบัวหลวง 1 และ 5 ชั้น แต่มีความแตกต่างกันที่ จำนวนชั้น 2 3 และ 4 ชั้น

จากผลการทดสอบดังกล่าวเครื่องต้นแบบ สามารถตัดใบบัวหลวงได้ดีที่สุดที่ความเร็วของชุด ลำเลียงใบบัวหลวง 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของ ใบบัวหลวงที่ใช้ทดสอบ 5 ใบ มีเปอร์เซ็นต์การตัดใบบัว หลวงสูงที่สุด 98.9 % รวมทั้งมีเปอร์เซ็นต์ความ เสียหายน้อย และมีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



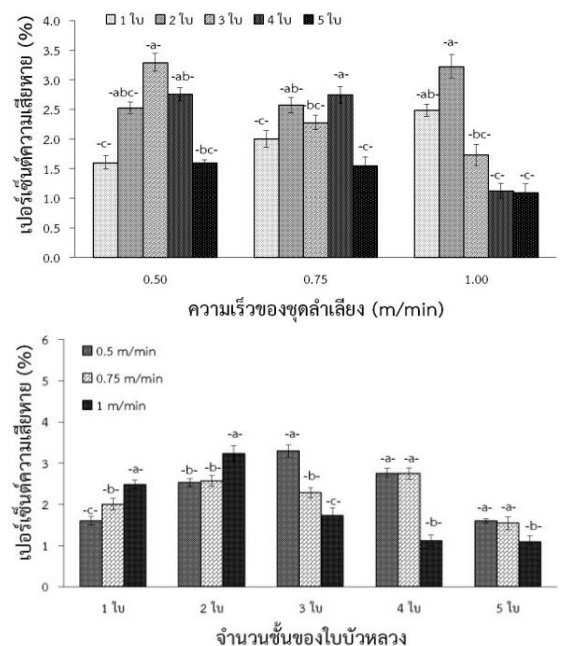
รูปที่ 6 เปอร์เซนต์การตัดใบบัวหลวงที่ความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นใบบัวหลวงต่าง ๆ (abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบบัวหลวง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งในการทดสอบที่ความเร็วของชุดลำเลียงใบบัวหลวง และจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ใช้ทดสอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 7 มีค่าระหว่าง 1.1- 3.3 %

ในกรณีที่ทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลำเลียงในกลุ่มเดียวกัน พบว่าจำนวนชั้นของใบบัวหลวง มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในแต่ละกลุ่มความเร็ว และยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบบัวที่ต่ำที่สุดคือการทดสอบโดยใช้ใบบัวหลวงซ้อนกัน 5 ชั้น ส่วนในกรณีที่ทดสอบโดยใช้จำนวนชั้นของใบบัวหลวงในกลุ่มเดียวกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบบัวจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของชุดลำเลียงเมื่อทดสอบโดยใช้ใบบัวหลวงซ้อนกัน 1 และ 2 ชั้น แต่จะเสียหายลดลงเมื่อใช้ใบบัวหลวงซ้อนกัน 3 4 และ 5 ชั้น ตามลำดับ จากการสังเกตขณะการ

ทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของชุดลำเลียง ความเร็วในการตัดของใบมีดจะเพิ่มขึ้น โดยความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้การตัดใบบัวหลวงของเครื่องที่ใช้กับจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ซ้อนกันน้อยจะมีความเสียหายมากกว่าชุดใบบัวหลวงที่ซ้อนกันมากขึ้น นั่นหมายความว่าความเร็วของใบมีดที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลต่อจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ซ้อนกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความเร็วของชุดลำเลียงที่ทำให้ความเร็วในการตัดเหมาะสมกับจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ซ้อนกัน ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเร็วของชุดลำเลียงใบบัวหลวง 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ใช้ทดสอบ 5 ชั้น มีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบบัวต่ำที่สุด 1.1 % ดังนั้นความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นที่ซ้อนกันดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องตัดใบบัวหลวง



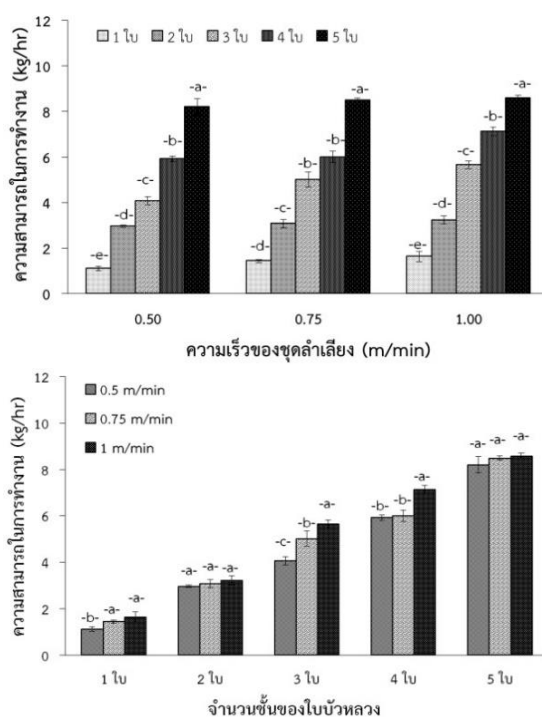
รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ความเสียหายของใบบัวหลวงที่ความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นใบบัวหลวงต่าง ๆ (abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ความสามารถในการทำงานของเครื่อง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังรูปที่ 8 พบว่าความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลำเลียงต่าง ๆ ของแต่ละจำนวนชั้นของใบบัวหลวง และไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใช้จำนวนชั้นของใบบัวหลวง 2 และ 5 ชั้น ของแต่ละกลุ่มความเร็วของชุดลำเลียง แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใช้จำนวนชั้นของใบบัวหลวง 1 3 และ 4 ชั้น ของแต่ละกลุ่มความเร็วของชุดลำเลียง

จากผลการทดลองโดยใช้จำนวนชั้นของใบบัวหลวง และความเร็วของชุดลำเลียงต่างๆ ดังรูปที่ 8 พบว่าความสามารถในการทำงานมีค่าระหว่าง 1.1-8.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งความสามารถในการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นของใบบัวหลวง เนื่องจากใบบัวหลวงจะเคลื่อนที่เข้าไปตัดได้เร็ว และในปริมาณมากขึ้น

จากผลการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถตัดใบบัวหลวงได้ดีที่สุด (98.9 %) ที่ความเร็วของชุดลำเลียงใบบัวหลวง 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นของใบบัวหลวงที่ใช้ทดสอบ 5 ชั้น มีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด 8.58 ± 0.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 68.64 กิโลกรัมต่อวัน (ทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเกษตรกรที่ทำงานได้ประมาณ 16 กิโลกรัมต่อวัน จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้มากกว่าการทำงานของเกษตรกรถึง 52 กิโลกรัมต่อวัน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ความสามารถในการทำงาน 8.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 8 ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วของชุดลำเลียงและจำนวนชั้นใบบัวหลวงต่างๆ (abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

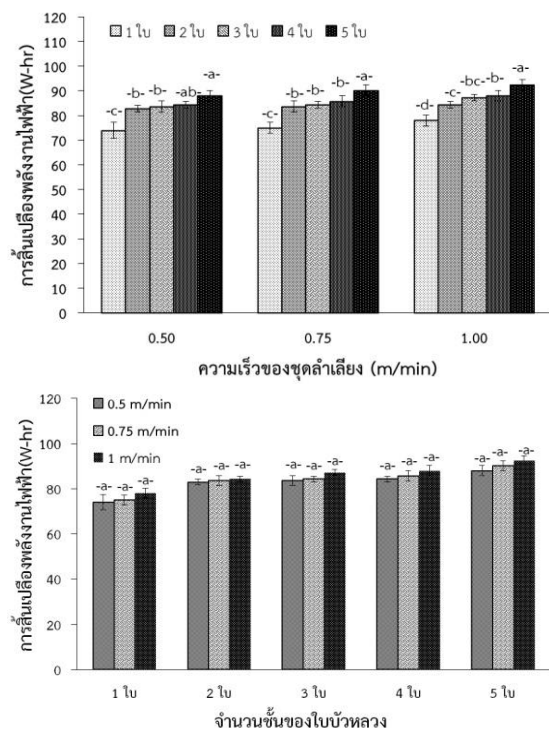
การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลำเลียงต่างๆ ของแต่ละจำนวนชั้นของใบบัวหลวง และไม่มี ความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใช้จำนวนชั้นของใบบัวหลวงต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วของชุดลำเลียง ดังรูปที่ 9

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 9 พบว่าช่วงความเร็วที่ใช้ขับเคลื่อนใบบัวหลวง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า และจำนวนชั้นของใบบัวหลวงมีค่าระหว่าง 74.0-92.4 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งจะนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนความเร็วของชุดลำเลียง 1 เมตรต่อนาที เท้ากับ 92.4

วัด-ชั่วโมง ไปเป็นค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์เชิง

เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 9 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วของชุด
ลำเลียงและจำนวนชั้นใบมีดของใบมีดต่าง ๆ (abc
อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่า
มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม
โดยคิดที่ราคาเครื่องต้นแบบ 40,000 บาท อายุการใช้
งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ย 10 % ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน
ความสามารถในการทำงาน 8.58 กิโลกรัมชั่วโมง การใช้
พลังงานไฟฟ้า 92.4 วัตต์-ชั่วโมง เมื่อใช้เครื่องตัดใบมีด
หลวง 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง
5.24 บาทต่อกิโลกรัม ระยะคืนทุน 2.8 เดือน จุดคุ้มทุน
81.1 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน 1 คน

สรุปผล

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องตัดใบมีดหลวง
โดยใช้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ เปอร์เซ็นต์การตัดใบมีดหลวง
เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ความสามารถในการทำงาน
และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า พบว่าเครื่องตัดใบมีด
หลวงต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุด ที่ความเร็วของชุด
ตัดลำเลียงใบมีดหลวง 1 เมตรต่อนาที และจำนวนชั้นใบ
มีดหลวง 5 ชั้น ด้วยความสามารถในการทำงาน 8.58
กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์การตัดใบมีดหลวง 98.9 %
เปอร์เซ็นต์ ความเสียหายในการตัดใบมีดหลวง 1.1 %
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 92.4 วัตต์-ชั่วโมง และ
เครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้เร็วกว่าแรงงานคน
4.3 เท่า ซึ่งเครื่องตัดใบมีดหลวงต้นแบบสามารถนำไปใช้
ทดแทนแรงงานคนได้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ
รายได้ประจำปีของคณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมทั้งภาควิชา
วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร. ธัญบุรี ที่
สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

1. Lotus production situation. [Internet]. Bangkok: Department of Agriculture Extension. [updated 2017 May 16; cited 2018 Jul 9]. Available from: <http://www.doae.go.th/LIBRARY/>.
2. Suwannaro T. Lotus farming. Extension and Training Office. Bangkok: Kasetsart University; 2007.

3. Mueangsuk S. Lotus farming in Bueng Kan. [Internet]. Bangkok: khaosod Online. [updated 2016 Feb; cited 2016 Feb 15]. Available from: <https://www.khaosod.co.th/viewnewsonline.phpnewsid>.
4. Jolly RS. Benefits of the lotus plant. [Internet]. Mumbai. [updated 2018 October; cited 2019 January 25]. Available from: <https://caloriebee.com/nutrition/Health-Benefits-Of-Lotus-Roots-Or-Stem-Seeds-Leaves-And-Flowers>.
5. Fisher S. Top 10 lotus leaf tea health benefits / effects [Internet]. [updated 2017 October; cited 2019 January 27]. Available from: <https://www.airytea.com/blog/lotus-leaf-tea-health-benefits-effects>.
6. Wikipedia. Lotus tea. [Internet]. [updated 2018 October; cited 2019 February 20]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus-tea>
7. Manojai K. Lotus leaf tea health benefits. [Internet]. Bangkok: technologychaoban. [updated 2016 Nov; cited 2019 Feb 15]. Available from: <https://www.technologychaoban.com/newsslide/article-7140>.
8. William H and George W L. Official methods of analysis of AOAC International. 18th ed. Texas. Gaithersburg, Md.: AOAC International, 2005.
9. จตุรงค์ ลังกาพินธุ์. ทฤษฎีของเครื่องจักรกลเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด; 2558.
10. Krutz G, Thomson L, Claar P. Design of agricultural machinery. 1st ed. New York: John Wiley and Sons; 1994.
11. Shigley JE, Mischke CR. Mechanical engineering design. 5th ed, USA: McGraw-Hill Book Company; 1989.
12. จตุรงค์ ลังกาพินธุ์. ออกแบบและเขียนแบบวิศวกรรมด้วยโปรแกรม SolidWorks. พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด; 2560.
13. Hunt D. Farm power and machinery. 10th ed. Iowa, USA: Iowa State University Press; 2001.



การประเมินสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านจุลชีพจากสารสกัดเอทานอลของผลตะขบป่า

Evaluation of Phytochemical Screening, Antioxidant and Antimicrobial Activities from Ethanolic Extracts of the *Flacourtia Indica* (Brum.f.) Merr. Fruits

พัทวัฒน์ สีขาว^{1*} เรณูภา เชื้อบุญมี¹ ปณิธาน สุระยศ¹ สาธิต ฉัตรพันธุ์² และ นฤมล เกื่อนกุล²

Pattawat Seekhaw^{1*}, Renuka Chuaboonmee¹, Panitan Surayot¹, Satit Chadpan² and Naruemol Thurnkul²

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

²สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

¹Chemistry Department, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University
Muang District Phisanulauk 65000, THAILAND

²Microbiology Department, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University
Muang District Phisanulauk 65000, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 22 May, 2020

Revised: 1 June, 2020

Accepted: 23 June, 2020

Available online: 29 June, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.12

Keywords: *Flacourtia indica*

(Burm.f.) Merr., phytochemical,

antioxidant activity,

antimicrobial activity

The objectives of this research were to evaluate the preliminary phytochemical screening, antioxidant and antimicrobial activities of ethanolic extracts from the peel, pulp, and the seed of *Flacourtia indica* (Brum.f.) Merr. Phytochemical screening revealed the presence of phenolics, flavonoids, tannins, saponins, diterpenes, and anthraquinones in the peel extracts; phenolics, flavonoids, and tannins in the pulp extracts; and flavonoids and tannins in the seed extracts. The total phenolics content (TPC) and total flavonoid content (TFC) of the extracts were determined using the folin-ciocalteu reagent and aluminium chloride colorimetric methods (expressed in gallic acid (GAE) and quercetin (QE) equivalent respectively). The highest TPC was found in pulp extract (30.44 ± 0.67 mg GAE/ 100 g DW) and TFC was the greatest amount in seed extract (1093.33 ± 1.53 mg QE/ 100 g DW). The peel extract exhibited the strongest antioxidant properties as shown by DPPH, ABTS, and FRAP assays ($IC_{50} = 0.13$

± 0.01 , 28 ± 0.01 mg/ml and FRAP value = 305.04 ± 3.68 mg FeSO₄ /100 g DW, respectively). In addition, all extracts (200 mg/ml) showed antimicrobial activity. The peel extract inhibited gram positive bacteria (*Bacillus subtilis*, *Micrococcus luteus*, *Staphylococcus aureus*, and *Streptococcus faecalis*), gram negative bacteria (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*, and *Serratia marcescens*) and yeast (*Candida albicans*). The pulp extract inhibited the same gram positive bacteria as the peel extract and four gram negative bacteria (*E. coli*, *Proteus vulgaris*, *P. aeruginosa* and *S. typhimurium*). The seed extract inhibited three gram positive bacteria (*B. subtilis*, *M. luteus*, and *S. aureus*) and one gram negative bacteria (*E. coli*). These results suggested that the ethanolic extracts of *F. indica* fruits could be the potential source of natural antioxidant and antimicrobial agents for nutraceutical and medical applications.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบหาสารพฤกษเคมีเบื้องต้นฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพของสารสกัดเอทานอลจากผลตะขบป่า (เปลือก เนื้อและเมล็ด) โดยสารสกัดจากเปลือกพบ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ไคโตนินและแอนทราควิโนน สารสกัดจากเนื้อพบสารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์และแทนนิน พบฟลาโวนอยด์และแทนนินในสารสกัดเมล็ดหาปริมาณฟีนอลิกรวม (TPC) และฟลาโวนอยด์รวม (TFC) ใช้วิธี Folin-Ciocalteu Reagent และ Aluminium Chloride Colorimetric แสดงผลสมมูลกับ Gallic Acid (GAE) และ Quercetin (QE) ตามลำดับ พบ TPC สูงสุดในสารสกัดเนื้อ (30.44 ± 0.67 mg GAE/ 100 g DW) และ TFC สูงสุดในสารสกัดเมล็ด (1093.33 ± 1.53 mg QE/ 100 g DW) สารสกัดจากเปลือกแสดงคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระที่สูงสุดด้วยวิธี DPPH ABTS และ FRAP (ค่า IC₅₀ = 0.13 ± 0.01 , 28 ± 0.01 mg/ml และ FRAP value = 305.04 ± 3.68 mg FeSO₄/100 g DW, ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดทุกชนิด (200 mg/ml) แสดงฤทธิ์ต้านจุลชีพ สารสกัดเปลือกยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก (*Bacillus subtilis*, *Micrococcus*

luteus, *Staphylococcus aureus* และ *Streptococcus faecalis*) แบคทีเรียแกรมลบ (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium* และ *Serratia marcescens*) และยีสต์ *Candida albicans* สารสกัดเนื้อยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก 4 ชนิด เช่นเดียวกับสารสกัดเปลือก และแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*, *Proteus vulgaris*, *P. aeruginosa* และ *S. typhimurium*) สารสกัดเมล็ดยับยั้ง *B. subtilis*, *M. luteus*, *S. aureus* และ *E. coli* ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าสารสกัดเอทานอลของผลตะขบป่าเป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพที่มีศักยภาพสำหรับประยุกต์ใช้ด้านโภชนาการและทางการแพทย์

คำสำคัญ: ตะขบป่า สารพฤกษเคมี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านจุลชีพ

บทนำ

ตะขบป่า (*Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr.) เป็นไม้ยืนต้นอยู่ในวงศ์ Flacourtiaceae พบในพื้นที่ป่าเต็งรัง ป่าชายหาด ป่าเบญจพรรณ ป่าดิบแล้ง ป่าผสมผลัดใบ และบริเวณริมน้ำ ผลสุกมีสีแดง ลักษณะกลม

หรือรูปใช้รับประทานได้ เป็นพืชสมุนไพรของไทยที่มีสรรพคุณในการใช้ส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นใบเปลือกลำต้นผลไม้รากและส่วนเหนือดินทั้งหมดของพืช สามารถใช้ในการรักษาโรคที่แตกต่างกัน เช่น รากต้มดื่มแก้ริดสีดวง แก้ไข้ แก้ท้องร่วง ขับเหงื่อ ขับพยาธิ ทั้งต้น แก้โรคผิวหนัง ใบสด ลดไข้ในเด็ก แก้โรคปอดอักเสบ แก้ไอ แก้บิด และท้องเสีย ผลสุก กินสดแก้ปวดท้อง แก้ไอ เป็นต้น (1, 2) สารสกัดเมทานอลจากเปลือกและเนื้อของผลตะขบป่าเป็นแหล่งสารพฤกษเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และคอนเดนส์แทนนิน โดยสารฟีนอลิกหลักที่พบในสารสกัดจากเปลือก ได้แก่ caffeic acid, p-hydroxybenzaldehyde, ferulic acid และ p-coumaric acid ในส่วนสารสกัดจากส่วนเนื้อพบสารฟีนอลิก ได้แก่ caffeic acid, vanillic acid, ferulic acid และ p-coumaric acid (3) และยังมีรายงานว่าสารสกัดเมทานอลจากผลของตะขบป่าที่ปลูกและบริโภคในประเทศศรีลังกาพบสารฟีนอลิก 35 ชนิด โดยวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค LC-MS (4) สารสกัดเมทานอลจากรากของตะขบป่า แสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย โดยตรวจพบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน แอลคาลอยด์ แทนนิน เทอร์พีนอยด์ ไกลโคไซด์ และฟีนอลิก นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์สารสกัดดังกล่าวด้วยเทคนิค GC-MS พบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลักคือ 4-Benzyol-3-methoxyisocoumarin (5) สารสกัดจากเปลือกต้นและใบพบสารฟีนอลิกและมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (6) สารสกัดจากส่วนเหนือดินช่วยป้องกันความเป็นพิษต่อตับที่เกิดจากการได้รับยาพาราเซตามอลเกินขนาดในหนูทดลอง (7) และสามารถใช้ในการรักษาความผิดปกติในตับของหนูทดลองอีกด้วย (8) สารสกัดจากผลสุกแสดงให้เห็นถึงสัญญาณในการใช้รักษาโรคในตับผิดปกติที่เกิดจากการได้รับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) (9) และยังพบว่าสารสกัดจาก ใบ กิ่งและส่วนเหนือดินแสดงฤทธิ์การต้านมาลาเรีย (10, 11)

ปัจจุบันเกษตรกรไทยหลายรายได้เริ่มมีการเพาะปลูกตะขบป่าในเชิงเศรษฐกิจมากขึ้น เนื่องจากผลมี

รสาชาติอร่อยทำให้เป็นที่นิยมแก่ผู้บริโภคเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังการรายงานข้อมูลทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับผลของตะขบป่ายังไม่แพร่หลายมากนัก และเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลตะขบป่าเพื่อนำไปต่อยอดทางเศรษฐกิจแก่เกษตรกรผู้ปลูกตะขบป่า ดังนั้นวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสารพฤกษเคมีเบื้องต้นหาปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี folin-ciocalteu reagent และ aluminium chloride colorimetric ตามลำดับ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี (DPPH ABTS และ FRAP) และฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและยีสต์ด้วยวิธี disc diffusion จากสารสกัดหยาบเมทานอลของเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานทางโภชนาการหรือนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ด้านโภชนาการและทางการแพทย์ที่มีมูลค่าได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือ

เครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง ได้แก่ เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary evaporator) รุ่น R-300 ยี่ห้อ Buchi บริษัท BUCHI Labortechnik AG ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) รุ่น SevenEasy ยี่ห้อ Mettler Toledo บริษัท ฟิฟิเคมิกคอล จำกัด ประเทศไทย เครื่องอ่านปฏิกิริยาบนไมโครเพลท รุ่น Spectro star ยี่ห้อ Spectro star nano บริษัท BMG Labtech ประเทศเยอรมัน Micropipette ขนาด 50-200 ไมโครลิตร รุ่น Finnpiipette F2 บริษัท Thermo scientific ประเทศฟินแลนด์

สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังนี้ 2,2-ไดฟีนิล-1-พิกริลไฮดราซิล, (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl,) (DPPH) บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา 2,2-อะซิโน-บิส (3-เอทิลเบนโซโทอะโซลีน-6-ซัลโฟนิค

แอสิด, (2,2-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid diammonium salt, (ABTS) บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา 2,4,6-ทริส (2-ไพริดีล)-เอส-ไตรอะซีน, (2,4,6-Tris (2-pyridyl)-s-triazine, (TPTZ) บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา และอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อ Nutrient broth (NB), Mueller-Hinton agar (MHA)

การเตรียมตัวอย่างพืชและการสกัดสาร

ผลตะขบป่าถูกเก็บมาจากพื้นที่ตำบลวังสำโรง ห้วย อำเภอดงพนาหิน จังหวัดพิจิตร ในวันที่ 1 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2562 ได้รับการพิสูจน์เอกลักษณ์พืชและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ ณ ห้องเก็บรวบรวมตัวอย่างพรรณไม้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ พิบูลสงคราม (voucher specimen no. PSRU 1011) นำส่วนต่างๆ ของผลตะขบป่าได้แก่ เปลือก เนื้อ และเมล็ด อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบดให้ละเอียด จากนั้นนำส่วนของเปลือก เนื้อ และเมล็ดผงที่ได้อย่างละ 100 กรัม สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลเป็นเวลา 7 วัน กรองสารละลาย (สกัด 2 ครั้ง) นำสารละลายที่กรองได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสารแบบลดความดัน จะได้สารสกัดหยาบเอทานอลของเปลือก เนื้อ และเมล็ด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 1.09, 8.01 และ 9.14 ตามลำดับ เก็บสารสกัดในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 °C

การตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น (Phytochemical Screening)

การตรวจสอบสารพฤกษเคมีของสารสกัดหยาบเอทานอลจากเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่า โดยอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอน ประกอบด้วยสารพฤกษเคมี 8 กลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ไตรเทอร์พีน ไดเทอร์พีน แอลคาลอยด์ และแอนทราควิโนน (12) ดังนี้

การตรวจสอบฟีนอลิก โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที ทิ้งไว้ให้

เย็นและกรอง หยด 2 % เฟอริกคลอไรด์ (2 % FeCl_3) ถ้าสารละลายให้สีน้ำเงินเข้มหรือสีดำแสดงว่าพบฟีนอลิก

การตรวจสอบฟลาโวนอยด์ โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลองเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) 1 ml ใส่หลอดแมกนีเซียม (Mg) ลงไป 2 ชิ้น เล็ก ๆ ถ้าฟองที่เกิดเป็นสีส้มแดงหรือชมพู แสดงว่าพบฟลาโวนอยด์

การตรวจสอบแทนนิน โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลองเติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นและกรองสารละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้หยด 10 % เลดอะซิเตต (10 % $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) ถ้าเกิดตะกอนสีขาวขุ่นแสดงว่าพบแทนนิน

การตรวจสอบซาโปนิน โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นจำนวน 5 ml นำไปอุณหภูมิ 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วกรองสารละลาย เขย่าแรง ๆ หากเกิดฟอง และคงอยู่ประมาณ 10 นาที แสดงว่าพบซาโปนิน

การตรวจสอบไดเทอร์พีน โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นกรองสารละลาย หยด 10 % คอปเปอร์อะซิเตรท (10 % $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) ถ้าสารละลายเกิดสีเขียวมรกต แสดงว่าพบไดเทอร์พีน

การตรวจสอบไตรเทอร์พีน โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที เขย่าแล้วกรอง จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 2 ml เขย่าเบา ๆ ทิ้งไว้สัก 2-3 นาที สังเกตสีของสารละลายชั้นล่างที่เกิดขึ้นหากปรากฏสีน้ำตาลแดงแสดงว่าพบไตรเทอร์พีน

การตรวจสอบแอลคาลอยด์ โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นและกรองสารละลาย ทดสอบด้วย Wangner's reagent หากเกิดตะกอนสีน้ำตาลแสดงว่าพบสารแอลคาลอยด์

การตรวจสอบแอนทราควิโนน โดยซังสารสกัด 100 mg ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 5 ml อุณหภูมิ 10 นาที เขย่าและกรองจากนั้นเติม 10 % แอมโมเนีย

(10 % NH_3) 2 ml ถ้าชั้นแอมโมเนียมีสีส้ม แดง ชมพู เหลืองส้ม แสดงว่าพบอนุพันธ์แอนทราซิน

การหาปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Content)

การหาปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Reagent เป็นวิธีที่ดัดแปลงจาก (13) โดยใช้กรด แกลลิก (Gallic Acid) เป็นสารมาตรฐาน เตรียมความเข้มข้นของสารสกัดหยาบเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่าที่ความเข้มข้น 1.00 mg/ml ปิเปตต์สารสกัดตัวอย่าง 12.5 μl ลงในไมโครเพลท 96 well ตามด้วยน้ำกลั่น 12.5 μl และ โฟลีน-ซีโอแคลทู รีเอเจนต์ (folin-ciocalteu reagent) 12.5 μl ตั้งทิ้งไว้ 6 นาที จากนั้นเติม 7.5 % โซเดียมคาร์บอเนต (7.5 % NaCO_3) 125 μl ตามด้วยน้ำกลั่น 100 μl เขย่าตั้งทิ้งไว้ 90 นาที จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm (ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารตัวอย่างจากสมการเส้นตรง ($y=mx+c$) ของกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) ในหน่วยของ มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้ง (Milligram of Gallic Acid Qequivalents/100 Gram of Dried Weight, mg GAE/100 g DW)

การหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content)

การหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium Chloride Colorimetric เป็นวิธีที่ดัดแปลงจาก (14) โดยใช้เคอร์เซติน (Quercetin) เป็นสารมาตรฐาน ปิเปตต์สารสกัดตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1.00 mg/ml ปริมาตร 125 μl ใส่ลงบนไมโครเพลท 96 well เติมน้ำ 5 % โซเดียมไนไตรต์ (5 % NaNO_2) ปริมาตร 12.5 μl ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติมน้ำ 10 % อะลูมิเนียมคลอไรด์ (10 % AlCl_3) ปริมาตร 37.5 μl จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 nm โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ครั้ง คำนวณหา

ปริมาณฟลาโวนอยด์รวมจากสมการเส้นตรง ($y=mx+c$) ของกราฟมาตรฐานเคอร์เซตินในหน่วยของมิลลิกรัมสมมูลของเคอร์เซตินต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้ง (milligram of quercetin equivalents/100 gram of dried weight, mg QE/100 g DW)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจาก (15) เตรียมสารละลายตัวอย่างเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่าเริ่มที่ความเข้มข้น 10 mg/ml จากนั้นทำการเจือจางสารละลายในความเข้มข้นที่เหมาะสม ปิเปตต์สารสกัดตัวอย่างปริมาตร 100 μl ใส่ลงบนไมโครเพลท 96 well เติมสารละลาย DPPH ที่มีความเข้มข้น 0.2 mM ปริมาตร 100 μl ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 nm จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% Radical Scavenging) โดยใช้สูตร ดังนี้

% Radical scavenging

$$= [(A \text{ control} - A \text{ sample}) / A \text{ control}] \times 100$$

เมื่อ A sample คือ ค่า Absorbance (ค่าการดูดกลืนแสง) ที่วัดได้ของสารผสมระหว่างสารละลาย DPPH กับสารตัวอย่าง
A control คือ ค่า Absorbance (ค่าการดูดกลืนแสง) ที่วัดได้ของสารละลาย DPPH (ไม่ผสมสารตัวอย่าง)

ทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระ (% Radical Scavenging) และความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแสดงเป็นค่าความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ 50 % (IC_{50})

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) เป็นวิธีดัดแปลงมาจาก (16) เตรียมสารละลายตัวอย่างเปลือก เนื้อ และ เมล็ดของผลตะขบป่าเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 10 mg/ml จากนั้นทำการเจือจางสารละลายในความเข้มข้นที่เหมาะสม เตรียมสารละลาย $ABTS^{+}$ โดยการผสม 7 mM ABTS 1 ml กับ 2.4 mM โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (2.4 mM $K_2S_2O_8$) 1 ml แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เจือจางสารละลาย $ABTS^{+}$ ด้วยเอทานอล แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงให้ได้ประมาณ 0.7 ที่ความยาวคลื่น 734 nm ปิเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 20 μ l ใส่ลงบนไมโครเพลท 96 well เติมสารละลาย $ABTS^{+}$ ปริมาตร 180 μ l ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 734 nm ทำการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระ (% Radical Scavenging) และความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อคำนวณหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแสดงเป็นค่าความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ 50 % (IC_{50})

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP) เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจาก (17) โดยปิเปตสารสกัดตัวอย่างเปลือก เนื้อ และ เมล็ดของผลตะขบป่าที่มีความเข้มข้น 1 mg/ml ปริมาตร 20 μ l ใส่ลงบนไมโครเพลท เติม FRAP Reagent ปริมาตร 180 μ l ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 593 nm จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (FRAP Value) ของ

สารตัวอย่างจากสมการเส้นตรง ($y=mx+c$) ของกราฟมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) แสดงค่าในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg $FeSO_4$ /100 gram of dried weight, mg $FeSO_4$ /100 g DW)

การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและยีสต์ด้วยวิธี Disc Diffusion

การทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียด้วยวิธี Disc Diffusion (18) โดยทดสอบฤทธิ์กับแบคทีเรียทดสอบ 9 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียแกรมลบ 5 ชนิดคือ *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Serratia marcescens* TISTR1354, *Salmonella typhimurium* TISTR1472 และ *Pseudomonas aeruginosa* แบคทีเรียแกรมบวก 4 ชนิดคือ *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Micrococcus luteus* TISTR1 9 1 8 , *Streptococcus faecalis* TISTR459 และยีสต์ 1 ชนิดคือ *Candida albicans* โดยเพาะเลี้ยงแบคทีเรียทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient Broth (NB) และเพาะเลี้ยงยีสต์ ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Yeast Extract Malt Extract Broth (YMB) จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำให้มีความเข้มข้นเท่ากับความขุ่นของ McFarland Standard scale No. 0.5 จากนั้นใช้ก้านพันสำลี (Cotton Swab) ปลอดเชื้อจุ่มลงไปนวดในสารแขวนลอยเชื้อ แล้วกวาดเชื้อ (Swab Plate) ให้ทั่วผิวน้ำอาหาร Mueller Hinton Agar (MHA) ทิ้งให้แห้งประมาณ 3-5 นาที วาง Paper Disc ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร บนผิวน้ำอาหาร จากนั้นหยดสารสกัดที่ต้องการทดสอบลงบน Paper Disc ปริมาตร 20 μ l/disc ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 10 นาที ซึ่งมียาปฏิชีวนะ 0.3125 mg/ml Chloramphenicol เป็นตัวควบคุมผลบวก (Positive Control) และ Dimethyl Sulfoxide (DMSO) เป็นตัวทำละลายและตัวควบคุมผลลบ (Negative Control) บ่มที่อุณหภูมิ 30-37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบการเกิดบริเวณยับยั้ง (Zone

of Inhibition) โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงใส (Clear Zone)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าทางสถิติ ด้วยวิธี T-test และ Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 22 ค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มที่มีตัวอักษรต่างกัน (a-b และ c-e) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $P < 0.01$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการตรวจสอบสารพฤษเคมีเบื้องต้น

ในการตรวจสอบสารพฤษเคมีจากส่วนต่าง ๆ ของผลตะขบป่า ได้แก่ เปลือก เนื้อ และเมล็ด โดยใช้เอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วสูงในการสกัด และยังมีความปลอดภัยเมื่อนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อไปได้ ผลตรวจสอบพบว่าสารสกัดเปลือก พบสาร 6 ชนิด คือ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ไตรเทอร์พีน และแอนทราควิโนน สารสกัดเนื้อพบสาร 3 ชนิด คือ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแทนนิน ส่วนสารสกัดเมล็ด พบสาร 2 ชนิดคือ ฟลาโวนอยด์ และแทนนิน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สารพฤษเคมีเบื้องต้นจากสารสกัดหยาบเอทานอลของเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่า

สารพฤษเคมี	สารสกัด		
	เปลือกตะขบป่า	เนื้อตะขบป่า	เมล็ดตะขบป่า
ฟีนอลิก	+	+	-
ฟลาโวนอยด์	+	+	+
แทนนิน	+	+	+
ซาโปนิน	+	-	-
ไตรเทอร์พีน	+	-	-
ไดเทอร์พีน	-	-	-
แอลคาลอยด์	-	-	-
แอนทราควิโนน	+	-	-

หมายเหตุ + หมายถึง ตรวจสอบพบ - หมายถึง ตรวจสอบไม่พบ

ตารางที่ 2 ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่า

สารสกัด	ปริมาณฟีนอลิกรวม (mg GAE/100 g DW)	ปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (mg RUE/ 100 g DW)	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ		
			DPPH IC ₅₀ of DPPH (mg/ml)	ABTS IC ₅₀ of ABTS (mg/ml)	FRAP FRAP value (mg FeSO ₄ /100 g DW)
เปลือกตะขบป่า	19.11 ± 0.52 ^a	145.15 ± 3.06 ^c	0.13 ± 0.01 ^c	0.28 ± 0.01 ^c	305.04 ± 3.68 ^c
เนื้อตะขบป่า	30.44 ± 0.67 ^b	51.60 ± 2.65 ^d	5.88 ± 0.04 ^c	4.48 ± 0.02 ^d	95.03 ± 3.82 ^d
เมล็ดตะขบป่า	NT	1093.33 ± 1.53 ^e	0.65 ± 0.05 ^d	1.08 ± 0.02 ^d	297.68 ± 3.69 ^e

*หมายเหตุ NT = not tested

ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ในแนวนอน โดย a-b ใช้สถิติ t-test และ c-e ใช้สถิติ DMRT

ตารางที่ 3 ผลทดสอบการยับยั้งจุลินทรีย์ของสารสกัดจากเปลือกตะขบป่า เนื้อตะขบป่า เมล็ดตะขบป่าที่ระดับความเข้มข้น 200 mg/ml

Microorganism		ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของบริเวณใส (mean $\pm$ SD) (mm)				
		Positive control	Negative	เปลือกตะขบป่า	เนื้อตะขบป่า	เมล็ดตะขบป่า
		(0.3125 mg/ml chloramphenicol)	control (DMSO)	(200 mg/ml)	(200 mg/ml)	(200 mg/ml)
Gram negative	<i>E. coli</i>	35.4	6.0	7.3 $\pm$ 0.33 ^{ab}	8.66 $\pm$ 0.03 ^{bcd}	8.50 $\pm$ 0.09 ^c
	<i>P. vulgaris</i>	14.5	7.3	6.3 $\pm$ 0.00 ^a	8.66 $\pm$ 0.03 ^{bcd}	7.00 $\pm$ 0.00 ^b
	<i>P. aruginosa</i>	12.5	7.4	8.8 $\pm$ 0.29 ^{bc}	8.16 $\pm$ 0.66 ^{abc}	7.16 $\pm$ 0.10 ^b
	<i>S. typhimurium</i>	32	7.3	10.0 $\pm$ 0.00 ^{cd}	8.83 $\pm$ 0.39 ^{bcd}	7.30 $\pm$ 0.00 ^b
	TISTR1472					
	<i>S. marcescens</i>	25.3	8	7.5 $\pm$ 0.46 ^a	6.50 $\pm$ 0.28 ^a	6.83 $\pm$ 0.29 ^b
	TISTR1354					
Gram positive	<i>B. subtilis</i>	34.3	6.8	10.3 $\pm$ 0.17 ^{de}	9.50 $\pm$ 0.08 ^{cd}	7.50 $\pm$ 0.28 ^b
	<i>M. luteus</i>	38.5	6.8	11.0 $\pm$ 0.00 ^{ef}	9.83 $\pm$ 0.12 ^{cd}	7.00 $\pm$ 0.00 ^b
	TISTR1918					
	<i>S. aureus</i>	27.8	6.0	12.3 $\pm$ 0.58 ^f	9.33 $\pm$ 0.41 ^{cd}	9.00 $\pm$ 0.00 ^c
	<i>S. faecalis</i>	44.3	6.0	10.8 $\pm$ 0.11 ^{ef}	10.16 $\pm$ 0.49 ^d	6.00 $\pm$ 0.00 ^a
	TISTR459					
Yeast	<i>C. albicans</i>	6.0	7.7	8.5 $\pm$ 0.74 ^{bc}	7.00 $\pm$ 0.00 ^{ab}	7.33 $\pm$ 0.00 ^b

*หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับแตกต่างกันตามแนวตั้งเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

จากข้อมูลการตรวจสอบสารพิษเคมีเบื้องต้น จะเห็นว่าสารสกัดทั้งสามส่วนของผลตะขบป่าเป็นแหล่งของออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีศักยภาพ โดยเฉพาะพบสารฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ามีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เช่น โรคหัวใจ โรคหลอดเลือด เป็นต้น (19) ผลการหาปริมาณสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมที่มีอยู่ในสารสกัดตัวอย่างส่วนต่างๆ ของผลตะขบป่าโดยใช้วิธี Folin-Ciocalteu Reagent และ Aluminiumchloride Colorimetric ตามลำดับ พบว่าสารสกัดจากเนื้อที่ความเข้มข้น 1.00 mg/ml มีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงสุด 30.44 $\pm$ 0.67 mg GAE/100 g DW ตามด้วยเปลือก 19.11 $\pm$ 0.52 mg GAE/100 g DW (ตารางที่ 2) สอดคล้องกับ

รายงานของ (4) พบว่าผลของตะขบป่าที่ปลูกและบริโภคในประเทศศรีลังกาประกอบด้วยสารฟีนอลิก 35 ชนิด โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค LC-MS แต่ในส่วนสารสกัดจากเมล็ดไม่ได้ทำการตรวจสอบ เนื่องจากตรวจสอบสารพิษเคมีเบื้องต้นไม่พบสารกลุ่มนี้ ผลการหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม พบว่าสารสกัดจากเมล็ดที่ความเข้มข้น 1.00 mg/ml มีปริมาณสูงสุด ตามด้วยเปลือก และเนื้อตามลำดับ (1093.33 $\pm$ 1.53, 145.15 $\pm$ 3.06 และ 51.60 $\pm$ 2.65 mg QE/ 100 g DW) แสดงผลดังตารางที่ 2 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าในส่วนของสารสกัดมีปริมาณของสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่แตกต่างกัน การศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นฤทธิ์ทางชีวภาพหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการศึกษาเพราะว่าอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุและก่อกลไก

สำคัญในการนำไปสู่ความเสื่อมและการเกิดโรคต่าง ๆ หลายโรคในปัจจุบัน การทดสอบคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบเอทานอลจากเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่า ในการทดลองนี้เลือกใช้วิธีในการทดสอบที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ DPPH ABTS และ FRAP ซึ่งทั้ง 3 วิธี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระเบื้องต้น มีกลไกการต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน สามารถทำได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว ให้ความถูกต้อง DPPH และ ABTS เป็นสารที่นิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเป็นอนุมูลอิสระที่มีความเสถียร โดยอนุมูลอิสระ DPPH อยู่ในสารละลายจะมีสีม่วงเข้ม เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สีม่วงของสารละลายจะจางลง ส่วนความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ABTS นั้น ใช้หลักการเช่นเดียวกับการลดลงของอนุมูลอิสระ DPPH แต่ในกรณีของ ABTS^{•+} เป็นอนุมูลอิสระที่มีประจุบวก อยู่ในสารละลายจะมีสีเขียว เมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสีเขียวของสารละลายจะจางลง รายงานผลเป็นค่า IC₅₀ (ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระลดลง 50 %) ส่วนวิธี FRAP เป็นเทคนิคที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นตัวรีดิวซ์ของสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งจะใช้หลักการที่แตกต่างไปจากทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น รายงานผลเป็นค่า FRAP Value คือค่าที่บอกความสามารถในการรีดิวซ์ Fe³⁺-TPTZ ให้เป็น Fe²⁺-TPTZ นั่นคือ FRAP Value สูงก็จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง (20, 21) การวิเคราะห์ความสามารถต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดหยาบเอทานอลเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่าด้วยวิธี DPPH พบว่าสารสกัดทุกส่วนมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ โดยแต่ละส่วนสกัดมีฤทธิ์ที่แตกต่างกัน คือ สารสกัดจากเปลือก มีฤทธิ์ดีที่สุด รองลงมาคือสารสกัดจากเมล็ด และเนื้อ ตามลำดับ (IC₅₀ เท่ากับ 0.13 ± 0.01, 0.65 ± 0.05 และ 5.88 ± 0.04 mg/ml ตามลำดับ) เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS พบว่า

แต่ละส่วนสกัดมีฤทธิ์ที่แตกต่างกันเช่นกัน คือ สารสกัดจากเปลือก มีฤทธิ์ดีที่สุด รองลงมาคือสารสกัดจากเมล็ด และเนื้อ ตามลำดับ (IC₅₀ เท่ากับ 0.28 ± 0.01, 1.08 ± 0.02 และ 4.48 ± 0.02 mg/ml ตามลำดับ) ส่วนผลการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP พบว่าแต่ละสารสกัดก็ฤทธิ์ที่แตกต่างกัน คือ สารสกัดจากเปลือก มีฤทธิ์ดีที่สุด รองลงมาคือสารสกัดจากเมล็ด และเนื้อ ตามลำดับ (FRAP Value เท่ากับ 305.04 ± 3.68, 297.68 ± 3.69 และ 95.03 ± 3.82 mg FeSO₄/100 g DW ตามลำดับ) จากผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของแต่ละส่วนสกัดของผลตะขบทั้ง 3 วิธี มีความสอดคล้องกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกันว่าทุกส่วนสกัดมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพ ซึ่งก่อนหน้านี้ (8) ได้รายงานว่าส่วนอื่นของตะขบป่า คือ เปลือก ลำต้น และใบ ก็มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และยังแสดงให้เห็นว่าสารสกัดที่แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระก็จะพบสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์อยู่ โดยมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาความสัมพันธ์สารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่พบในพืชหลายชนิดว่ามีบทบาทต่อการแสดงฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (22) แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาสารสกัดหยาบที่ตรวจหาองค์ประกอบสารฟลักซ์เคมีเบื้องต้น ไม่สามารถระบุชนิดสารบริสุทธิ์ที่มีบทบาทสำคัญในการออกฤทธิ์ ในรายงานนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดหยาบของแต่ละส่วนผลตะขบป่าเป็นแหล่งของสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ นอกจากนี้การทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดจากเปลือก เนื้อ และเมล็ดของผลตะขบป่าต่อการยับยั้งแบคทีเรียทดสอบ 10 ชนิด ด้วยวิธี Disc diffusion พบว่าเปลือกของผลตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก 4 ชนิด คือ *Bacillus subtilis*, *Micrococcus luteus* TISTR1918, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus faecalis* TISTR459 และแบคทีเรีย แกรมลบ 4 ชนิด คือ *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*

TISTR1472, *Serratia marcescens* TISTR1354 และให้ฤทธิ์การยับยั้งยีสต์ *Candida albicans* เนื้อของผลตะขบป่าให้ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมบวกทั้ง 4 ชนิด และแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *E. coli*, *Protues vulgaris*, *P. aeruginosa* และ *S. typhimurium* TISTR1472 ส่วนเมล็ดตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก 3 ชนิด คือ *B. subtilis*, *M. luteus* TISTR1918, *S. aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ 1 ชนิด คือ *E. coli* ดังตารางที่ 3 จากฤทธิ์การต้านแบคทีเรียและยีสต์พบว่าเปลือกและเนื้อของผลตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกทั้ง 4 ชนิด และยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบได้ทั้งหมดยกเว้น *P. vulgaris* และ *S. marcescens* TISTR1354 ซึ่งเปลือกของผลตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าเนื้อของผลตะขบป่าที่น่าสนใจคือเปลือกของผลตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งยีสต์ *C. albicans* ส่วนเมล็ดตะขบป่าให้ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก 3 ชนิด คือ *B. subtilis*, *M. luteus* TISTR1918, *S. aureus* และแบคทีเรียแกรมลบเพียง 1 ชนิด คือ *E. coli* จากผลการวิจัยพบปริมาณสารฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระสูงในเปลือกและเนื้อของผลตะขบป่าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (23-25) ที่รายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกเป็นเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary Metabolites) ของพืช พบได้ในพืชเกือบทุกชนิด สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสารยับยั้งแบคทีเรียโดยมีกลไกในการทำลายผนังเซลล์ (Cell Wall) เยื่อหุ้มเซลล์ (Cytoplasmic Membrane) และเยื่อหุ้มเซลล์ของโปรตีน (Membrane Protein) ของแบคทีเรียซึ่งส่งผลในการยับยั้งเชื้อทดสอบได้ดี นอกจากนี้ (5) ได้รายงานฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากรากของตะขบป่าที่พบสารประกอบ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ อัลคาลอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ไกลโคไซด์ เทอร์ปีนอยด์ และสเตอรอยด์ ที่ส่งผลในการยับยั้งแบคทีเรียทดสอบทั้งแกรมบวก (*Staphylococcus aureus*) และแกรมลบ (*Escherichia coli*, *Klebsiella*, *Shigella dysenteriae*, *Pseudomonas*, *Vibrio*

cholera, *Proteus*) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ที่มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ (26) ที่ทำการศึกษาปริมาณฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าสารสกัดที่มีปริมาณสารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูงสารนั้นจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระและยับยั้งแบคทีเรียในปริมาณที่สูงเช่นกัน และรายงานของ (27) ยังพบว่าสารสกัดจากใบสตรอว์เบอร์รีแสดงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณของฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงส่วนต่าง ๆ ของผลตะขบป่า (เปลือก เนื้อ และเมล็ด) เป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติและสารต้านจุลชีพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านโภชนาการ และทางการแพทย์ได้ต่อไป

สรุปผล

ผลจากการศึกษาสารสกัดหยาบเอทานอลจากส่วนต่าง ๆ ของผลตะขบป่า (เปลือก เนื้อ และเมล็ด) พบสารฟลักซ์เคมี 6 ชนิด ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ไดเทอร์พีน และแอนทราควิโนน สารสกัดจากเนื้อไม้ปริมาณฟีนอลิกรวมสูงสุด สารสกัดจากเมล็ดมีปริมาณฟลาโวนอยด์รวมสูงสุด และสารสกัดจากเปลือกแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีที่สุดด้วยวิธีที่ทดสอบแตกต่างกัน 3 วิธี (DPPH ABTS และ FRAP) รองลงมาคือสารสกัดจากเมล็ด และเนื้อ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรียและยีสต์ได้ด้วยแสดงให้เห็นว่าผลของตะขบเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีศักยภาพสามารถที่จะนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้ทางด้านโภชนาการและทางการแพทย์ได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้การ

สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงสาขาเคมี สาขาจุลชีววิทยา และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. เต็ม สมิตินันท์. ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [สืบค้นเมื่อวันที่ 8 เม.ย. 2563]. จาก: <http://www.dnp.go.th/botany/mplant/index.aspx>.
2. คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ตะขบป่า [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [สืบค้นเมื่อวันที่ 8 เม.ย. 2563] จาก : <http://www.phargarden.com/main.php?action=viewpage&pid=45>.
3. Ndhlala AR, Kasiyamhuru A, Mupure C, Chitindingu K, Benhura MA, Muchuweti M. Phenolic composition of *Flacourtia indica*, *Opuntia megacantha* and *Sclerocarya abirrea*. Food Chem. 2006;103(2007):82-7.
4. Alakolanga AGAW, Siriwardane AMDA. Siriwardane AMDA, Kumar S, Lalith J, Rakesh, et al. LC-MSⁿ identification and characterization of the phenolic compounds from the fruits of *Flacourtia indica* (Burm. F.) Merr. and *Flacourtia inermis* Roxb. Food res Int. 2014;62(2004):388-96.
5. Eramma N, Gayathri D. Antibacterial potential and phytochemical analysis of *Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr. root extract against human pathogens. Indo Am J Pharm Res. 2013;3(5):3832-46.
6. Swati M, Nath SG, Yatendra K, Kanchan K, Mohan SR, Prakash O. Phytochemical analysis and free-radical scavenging activity of *Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr. J Pharm Res. 2009;8(2):81-4.
7. Nazneen M, Mazid A, Kundu JK, Bachar SC, Begum F, Dat BK. Protective effects of *Flacourtia indica* aerial parts extracts against paracetamol-induced hepatotoxicity in rats. J Taibah Univ Sci. 2009;2:1-6.
8. Varkey J, Thomas J. Protective effect of *Flacourtia indica* (Brum. f) Merr. in methotrexate induced hepatotoxicity. Pharnanest. 2011;2(2-3):115-23.
9. Biswas A, Battu G. *Flacourtia indica* (burm.f.) prevents CCl₄ induced rat liver damage by augmenting antioxidant enzyme activity. Eur J Pharm Med Res. 2016;3(4):263-70.
10. Kaou AM, Mahiou-Leddett V, Canlet C, Debrauwer L, Hutter S, Laget M, et al. Antimalarial compounds from the aerial parts of *Flacourtia indica* (Flacourtiaceae), J Ethnopharmacol. 2010;130(2):272-4.
11. Sashidhara KV, Singh SP, Singh SV, Srivastava RK, Srivastava K, Saxena JK, et al. Isolation and identification of β -hematin inhibitors from *Flacourtia indica* as promising antiplasmodial agents. Eur J Med Chem. 2013;60:497-502.
12. โชติกา คุณประทุม, ปกิต กำบุญมา, ปุณฺณศรี ศรีสุพัฒน์, ชนกวร เผ่าศิริ. การตรวจสอบสารฟลักซ์เคมีป้องกันฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดเมทานอลจากยอดและกิ่งอ่อนสะเดาหวาน. รายงานการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ

2559. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย
บัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2559; 15
ม.ค.2559; มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น:
มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2559. น. 308-16.
13. Vichit W, Saewan N. Antioxidant activities
and cytotoxicity of Thai pigmented rice. *Int J
Pharm Pharm Sci.* 2015;7(7):329-34.
14. Phattatakorn K, Pajanyor P, Wongtecha S,
Prommakool A, Savebowon W. Effect of
germination on total phenolic content and
antioxidant properties of “Hang” rice. *Int
Food Res J.* 2016;23(1):406-9.
15. Vararat S, Managit C, Iamthanakul L, Soparat
W, Kamkean N. Examination of antioxidant
activity and development of rice bran oil
and gamma-oryzanol microemulsion. *J
Health Res.* 2010;24(2):67-72.
16. Pang Y, Ahmed S, Xu Y, Beta T, Zhu Z, Shao
Y, et al. Bound phenolic compounds and
antioxidant properties of whole grain and
bran of white, red, and black rice. *Food
Chem.* 2018;240:212-21.
17. Kaur M, Asthir B, Mahajan G. Variation in
antioxidant, bioactive compounds and
antioxidant capacity in germinated and
ungerminated grains of ten rice cultivars.
Rice Sci. 2017;24(6):349-59.
18. Bhargava S, Dhabhai K, Batra A, Sharma A,
Malhotra B. *Zingiber officinale*: Chemical and
phytochemical screening and evaluation of
its antimicrobial activities. *J Chem Pharm
Res.* 2012;4:360-64.
19. เจนจิรา จิรัมย์, ประสงค์ สีหนาม. อนุมูลอิสระและ
สารต้านอนุมูลอิสระ: แหล่งที่มาและกลไกการ
เกิดปฏิกิริยา [Oxidants and antioxidants:
sources and mechanism]. *วารสารวิชาการ
มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์.* 2554;1(1):59-70.
20. สุชาดา มานอก, ปวีณา ลิ้มเจริญ. การวิเคราะห์ฤทธิ์
ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP
และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสาร
สกัดสมุนไพรในตำรับยาหอมเทพจิตร[Investigation
antioxidant activity by DPPH, ABTS assay and
total phenolic compounds of herbal extracts
in Ya-Hom Thepphachit]. *วารสารก้าวหน้าโลก
วิทยาศาสตร์.* 2558;15(1):106-17.
21. นพวัฒน์ เฟ่งคำศรี, จัตุพล กันทะมูล, ภัทราภรณ์
โตวัฒนกิจ, วชิรวิทย์ วงศ์ชารัฐ, วนิดา ไชยมนัน, นิภา
พร เมืองจันทร์, และคณะ. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ
สารสกัดเหง้าข่าลิง [*Antioxidant effect of
Alpinia Conchigera* rhizome extracts]. *วารสาร
ไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ.*
2554;6(3):195-201.
22. Saxena M, Saxena J, Pradhan A. Flavonoid
and phenolic acids as antioxidants in plants
and human health. *Int J Pharm Sci Rev Res.*
2012;16(2):130-4.
23. ทิฐิมา ภาคภูมิ, กัลยาภรณ์ จันตรี, อรพิน โหม่ติบาล.
ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์และสารต้านอนุมูลอิสระของสาร
สกัดใบพลูเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องสำอาง
[Antimicrobial and antioxidant capacity of leaf
extract of *Piper betle* Linn. for development
to cosmetics]. *วารสารวิจัย มสธ สาขา
มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์.* 2559;9(1):1-20.
24. Hayriye CK, Melissa CN. Antimicrobial
efficacy of plant phenolic compounds

against *Salmonella* and *Escherichia coli*.

Food Biosci. 2015;2:8–16.

25. Windell LR, Demetrio L, Valle J, Jeannie A, Juliana JMP, Esperanza CC. Antibacterial activities of ethanol extracts of Philippine medicinal plants against multidrug-resistant bacteria. Asian Pac J Trop Biomed. 2015; 5(7):532–40.
26. สุภกร บุญยืน.ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ของสารสกัดพืชหางนกยูง [Decomposition antioxidant, antimicrobial activities, total phenolic content and total flavonoid content of *Delonix regia* (Boj. Ex Hook.) Raf. extracts]. Thai Journal of Science and Technology. 2559;5(1): 20-8.
27. Bouyahya A, Moussaoui NE, Abrini J, Bakri Y, Dakka N. Determination of phenolic contents, antioxidant and antibacterial activities of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) leaf extracts. Br Biotechnol J. 2016;14(3):1-10.

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

